



Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

- + *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.
- + *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.
- + *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.
- + *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página <http://books.google.com>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>

Stanford University Libraries



3 6105 027 619 241





67-1.306

A849

BULLETIN

DE

L'Association des Ingénieurs Electriciens

SORTIS DE

L'Institut Electro-Technique

MONTEFIORE

DEUXIÈME SÉRIE

TOME II.

Secrétaire Général

M. GUSTAVE L'HOEST, quai Mativa, 22, à Liège.

Secrétaires-adjoints

MM. COLARD, OSCAR, rue de la Station, à Huy.

DAWSON, PHILIP, rue Jonruelle, 49, à Liège.

On est prié d'adresser au Secrétaire-Général toutes les communications relatives aux publications de la Société.

LIÈGE

Imprimerie brevetée Gustave THIRIART, quai de la Batte, 5.

1891

1 0 1 2 7 8

2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

PRÉSIDENT D'HONNEUR :

M. le Sénateur George MONTEFIORE, fondateur de l'Institut Montefiore, rue de la Science, 35, Bruxelles.

MEMBRES HONORAIRES :

MM. CORNU, M.-Al., membre de l'Institut, ingénieur en chef des mines, professeur à l'Ecole polytechnique, rue de Grenelle, 9, à Paris;
 DELARGE, Frédéric, directeur-général des télégraphes, Bruxelles (gare du Nord);
 Eric GERARD, directeur de l'Institut Montefiore, place de l'Acclimatation, 3, à Liège;
 Sir William THOMSON, professeur à l'Université de Glasgow.

COMITÉ :

MM. de WEYDLICH, Titus,	<i>Président.</i>
BERTEMATI, Carlos,	<i>Vice-Président.</i>
DEMAN, Léon,	»
MINSIER, Camille,	»
PESCETTO, Frédéric,	»
L'HOEST, Gustave,	<i>Secrétaire-Général.</i>
ROOSEN, Alfred,	<i>Trésorier.</i>
DE BAST, Omer,	<i>Commissaire.</i>
LIBERT, Joseph,	»
NOWINSKY, Joseph,	»
COLARD, Oscar,	<i>Secrétaire adjoint.</i>
DAWSON, Philip,	»

ANCIENS PRÉSIDENTS :

MM. ZUNINI, Luigi, (1887-1889).
 LIBERT, Joseph, (1889-1890).

MEMBRES EFFECTIFS :

ARENDT, Charles (mines 1883, électricien 1884), fabricant d'armes, rue Trappé, 8, Liège.

ASTFALCK, Alfred (électricien 1886), ingénieur à l'Helios Act. Gesells. für elect. Licht, Steinstrasse, Cologne.

BARBERIS, Jean (électricien 1885), ingénieur à Alpi-gnano (Turin).

BASSOT, Auguste (mines 1883), ingénieur, Square de Jussieu, 10^{bis}, Lille.

BAYET, Maurice (électricien 1888), ingénieur, rue Hemricourt, 17, Liège.

BÈDE, Philippe (électricien 1890) ingénieur, rue Philippe-le-Bon, 87, Bruxelles.

BERTEMATI, Carlos (mines 1884, électricien 1886), directeur des mines de Cuatro Amigo, rue Larga, 59, Jerez de la Frontera (Espagne).

BERTOLINI, Jules (électricien 1889), lieutenant de la marine royale italienne, professeur à l'école des torpilleurs, Spezia.

BLANDOT, Charles (mines 1889, électricien 1890).

BROAD, Colin (électricien 1890), ingénieur à la Cie Internationale d'électricité, rue Grétry, 47, Liège.

BOURQUIN, Jules (électricien 1890), ingénieur à la Cie l'Electrique, Chaussée d'Anvers, 34, Bruxelles.

CAMMEO, A (ponts et chaussées 1885), ingénieur et industriel, via Manzoni, 38, Milan.

CAVALLI D'OLIVOLA, comte Camillo (électricien 1884, via di Po, 30, Turin.

CENTURIONE, Carlo (électricien 1886), ingénieur à la Società G^{ie} per l'illuminazione, station centrale d'électricité, Turin.

CHANTRAINE, Alphonse (électricien 1888, mines 1889), ingénieur à la fabrique de câbles de MM. Hen et C^{ie}, rue Stephenson, 10, Bruxelles.

CHAUDOIR, Maurice (électricien 1890), docteur en sciences physiques et mathématiques, rue des Houblonnières, Liège.

DE CLAUSONNE, Alfred (mines 1889), ingénieur aux établissements Sautter Lemonnier, boulevard Malesherbes, 58, Paris.

CLOSE, Ernest (mines 1884, électricien 1885), ingénieur à l'Administration des télégraphes, rue de Brabant, 174, Bruxelles.

COSTA, Emile (électricien 1885), ingénieur à la Società Anglo-Romana per l'illuminazione elettrica, Piazza Poli, 14, Rome.

CRUCIANI, Joseph (électricien 1889), ingénieur chez MM. Almeida et C^{ie}, Traversa do Athayde, 2, Lisbonne.

DE BAST, Omer (électricien 1890), ingénieur, rue de la Régence, 10, Liège.

DEMANY, Léon (arts et manif. 1878, électricien 1885), directeur de la C^{ie} belge du téléphone Bell, 73, rue de la Montagne, Bruxelles.

DEMARET, Léon (mines 1884, électricien 1885), ingénieur au corps des mines à Mons.

DIERMAN, William (électricien 1888), directeur de la Société d'éclairage et de transmission électrique à longue distance, rue de l'Est, 37, Bruxelles.

DISCRY, Emile (mines 1889, électricien 1890), ingénieur au corps des mines, rue du Pont-Neuf, 22, Charleroi.

DUSSART, Charles (mines 1884, électricien 1886), ingénieur à l'Administration des télégraphes, Gand.

DE ERCORECA, Rufino (mécanicien 1888, électricien 1890), chez M. Whinfield Esq. Lovaine Terrace, 10, Newcastle on Tyne.

EVEN, Victor (électricien 1887), rue de Brabant, 77, Bruxelles.

FRENAY, Henri (mines 1883, électricien 1884), ingénieur à l'Administration des télégraphes, rue Dupont, 59, Bruxelles.

GABET, H.-V. (mines 1884), ingénieur au corps royal des mines italien, rue de l'Indépendance, 20, Bologne.

GARNIER, Victor (électricien 1886), directeur des installations d'Avellino et Atripalda, à Avellino (Italie).

GÉRARD, Emile (mines 1883, électricien 1884), constructeur d'appareils de physique et de précision, quai d'Amercœur, 20, Liège.

GERLERI, César (électricien 1884), ingénieur à Ceva Bagnasco (Italie).

GROTTENDIECK, Paul (électricien 1890), ingénieur, rue St-Séverin, 105, Liège.

HAESSEN, Edmond (électricien 1886), lieutenant d'artillerie, professeur à l'Ecole militaire, Bruxelles.

HENRARD, Georges (électricien 1889), ingénieur à la C^{ie} Popp, rue Réaumur, 29, Paris.

JANSSEN, Alfred (mines 1889, électricien 1890), ingénieur à Hemixem, lez Anvers.

JONA, Emmanuel (électricien 1885), ingénieur à la Manufacture de câbles Pirelli, Milan.

LARMOYER, Georges (électricien 1888), directeur de la Société anonyme pour la construction d'appareils de sécurité pour voies ferrées, rue Sohet, 8, Liège.

LEMAIRE, Léon (mines 1887, électricien 1888), ingénieur, rue Paradis, 82, Liège.

DE LEMOS, Basto (électricien 1890), capitaine de corvette de la marine des Etats-Unis du Brésil, Hôtel d'Angleterre, Liège.

L'HOEST, Gustave (mines 1874, électricien 1888), ingénieur aux chemins de fer de l'Etat, quai Mativa, 22, Liège.

LIBERT, Joseph (mines 1874, électricien 1884), ingénieur au corps des mines, rue du Bosquet, 18, Liège.

LUDERGNANI, J (électricien 1889), ingénieur à la Société d'Eclairage et de transmission électriques à longue distance, rue de la Poste, 228, Bruxelles.

MANARA, Manarino (électricien 1889), ingénieur, rue Ricasoli, 2, Milan.

MASSON, Emile (mines 1884, électricien 1885), ingénieur au corps des mines, rue Chavannes, 3, Charleroi.

DE MELLO, Benjamin (électricien 1890), lieutenant de vaisseau de la marine des Etats-Unis du Brésil, Club Naval, Rio de Janeiro.

MÉLOTTE, Félix (mines 1887, électricien 1888), ingénieur à la C^{ie} internationale d'électricité, boulevard Frère-Orban, 32, Liège.

MINSIER, Camille (mines 1873, électricien 1885), ingénieur principal au corps des mines, rue de l'Ecluse, 19, Charleroi.

MORELLI, Hector (électricien 1886), Thomson Houston International Electric Co, 620, Atlantic Avenue, Boston Mass. (Etats-Unis).

NOVINSKY, Joseph, ingénieur à la Cie Ganz, rue Rosoumowska, 19, Odessa.

ORBAN, Charles (mécanicien 1889, électricien 1890), ingénieur aux établissements de MM. Beer, rue Nysten, 44, Liège.

PESCETTO, Frédéric (électricien 1887), major du génie militaire, à Maddalena.

PICARD, Georges (électricien 1889), directeur technique des papeteries Olin, à Virginal.

PICAZO, Léopold (électricien 1890), ingénieur de la Armada, Tarazona de la Mancha, Espagne.

PIÉRARD, Emile (mines 1886, électricien 1887), ingénieur à l'Administration des télégraphes, rue des Plantes, 25, Bruxelles.

QUINAUX, Ernest, capitaine commandant d'artillerie, boulevard de la Sauvenière, 66, Liège.

RANSY, Auguste (mines 1879, électricien 1884), ingénieur, rue du Parc, 57, Liège.

ROOSEN, Alfred (mines 1885, électricien 1886), ingénieur à l'Administration des télégraphes, rue Dupont, 40, Bruxelles.

SANTARELLI, Georges (ponts et chaussées 1887, électricien 1888), ingénieur à l'Administration de la marine, place Vittorio Emanuele, 9, Spezia.

SEGRE, Vito (électricien 1886), ingénieur, rue Massena, Turin.

TURCONI, Italo (ponts et chaussées 1878, mines 1884), ingénieur, 159, New Bond Street, Londres (W).

VAN VLOTEN, Paul (mines 1884, électricien 1885), ingénieur, rue de la Loi, 77, Bruxelles.

DU WELZ, Maurice (mines 1887, électricien 1889), ingénieur à la Société Electricité et Hydraulique, rue du Châlet, 15, St-Josse-ten-Noode (Bruxelles).

DE WEYDLICH, Titus (ponts et chaussées 1885, électricien 1888), assistant à l'Institut Montefiore, rue de la Cathédrale, 65, Liège.

WINSLOW, George-Herbert (électricien 1888), ingénieur à la Cie Westinghouse, 956, Penn Avenue, Pittsburgh, Penna (Etats-Unis).

ZUNINI, Luigi (électricien 1884), professeur à l'Institut technique supérieur, Piazza Duomo, 25, Milan.

MEMBRES ASSOCIÉS :

BOULVIN, Roch (mines 1881), ingénieur à l'Administration des télégraphes, rue St-Lazare, 67, Bruxelles.

DE CAZENAVE, Clément, ingénieur en chef de service technique de la Cie belge du téléphone Bell, rue Pont St-Laurent, 7, Verviers.

CLOEREN, Henri, chef du service des Essais aux usines de bronze phosphoreux de M. G. Montefiore-Levi, rue du Bronze, 8, Anderlecht (Bruxelles).

DELVAUX, Henri, ingénieur à la Société Tudor (éclairage électrique par accumulateurs), Ninove.

DULAIT, Julien (mines 1878), administrateur délégué de la Société Electricité et Hydraulique, rue de Montigny, 40, Charleroi.

DUMONT, Joseph (mines 1873), ingénieur à l'Administration des télégraphes, rue des Plantes, 25, Bruxelles.

HELLER, , Directeur de la C^{ie} Internationale d'Electricité, rue des Armuriers, 17, Liège.

MACQUET, Auguste (mines 1876), ingénieur au corps des mines et directeur de l'école des mines, boulevard Dolez, 2, Mons.

MALENGRET, Achille (mines), ingénieur à la Société Electricité et Hydraulique, à Charleroi.

MANNE, Jacques, directeur de la fabrique de bronze phosphoreux, rue du Bronze, 8, Anderlecht (Bruxelles).

PASQUALINI, Louis, professeur, ingénieur électricien, Via Colombo, 5, Spezia.

PIEPER, Henri (fils), administrateur délégué de la C^{ie} internationale d'électricité, rue des Bayards, Liège.

MEMBRES TEMPORAIRES :

ANDRINGA, Alexandre, capitaine d'artillerie, rue de la Province, 13, Liège.

BAIVY, Edouard, élève-ingénieur, rue des Croisiers, 2, Liège.

BARKANESKO, Jean, géomètre-arpenteur, place du Théâtre, 21, Liège.

VON BOSCHAN, Arthur (ponts et chaussées 1881), ingénieur aux chemins de fer Kaiser Ferdinand, Nordbahn, Burgring, 1, Vienne.

BRONNE, Georges, élève-ingénieur, rue d'Archis, 40, Liège.

COLARD, Oscar, professeur, rue de la Station, Huy.

COUNE, Gustave, ingénieur civil, rue Spintay, 57, Verviers.

DAWSON, Philip (ponts et chaussées 1890), rue Jonruelle, 49, Liège.

DEMANY, Ernest, étudiant, avenue d'Avroy, 12, Liège.

DEMARTEAU, Sylvain, rue Villette, 2, Liège.

DONEDDU, Louis, élève-ingénieur, rue Lairesse, 47, Liège.

DURAND, Jose-E., ingénieur, lieutenant de vaisseau, rue de l'Université, 8, Liège.

FARMAN, Dick, élève-ingénieur, rue Lairesse, 47, Liège.

FRANCKEN, Edmond (mines 1878), ingénieur aux chemins de fer de l'Etat, quai de Fragnée, Liège.

GRITTERS, Hendrik, ingénieur-mécanicien, rue d'Harscamp, 6, Liège.

GOURGHENBEKOFF, Abel, élève-ingénieur, rue des Croisiers, 2, Liège.

HAUMAN, Charles, rue de la Croix de Fer, 24, Bruxelles.

HILGERS, Charles, place de Bronckart, Liège.

DE JONGE, Willem, ingénieur mécanicien, rue Léopold, 9, Liège.

KEIFFENHEIM, Hugo, élève-ingénieur, rue Mosselman, 33, Liège.

KREGLINGER, Adolphe (mines 1878), rue Raikem, 22, Liège.

NAGTGLAS Versteeg, Cornelis Dirk, ingénieur civil, place Verte, 7, Liège.

RUTTEN, Arthur, élève-ingénieur, rue André-Dumont, 39, Liège.

SARMIENTO, Carlos, lieutenant d'artillerie, rue St-Etienne, 2, Liège.

SCARAMANGA, Pantalemon (mécanicien 1890), place St-Jacques, 13, Liège.

STERN-ELLREICH, Alfred, rue de la Cathédrale, 6, Liège.

TASTÉ, Albert (mines 1889), ingénieur à Verviers.

VAN DER GOOT, Fipko, ingénieur mécanicien, rue Surlet, 21, Liège.

SÉANCE DU 30 NOVEMBRE 1890.

Présidence de M. de Weydlich, président.

Ont signé la liste de présence, MM. Arendt, Bayet, Colard, Coune, Dawson, De Bast, Demarteau, Doneddu, Farman, Francken, Eric Gerard, Grottendieck, Hilgers, Keiffenheim, Larmoyer, L'Hoest, Libert, Minsier, Orban, Roosen, de Weydlich.

Communication est donnée du procès-verbal de la séance du 26 octobre par le dépôt, sur le bureau, du Bulletin n^{os} 11-12.

Le Secrétaire-Général notifie la réception de deux ouvrages offerts par les auteurs à l'Association, savoir : le 1^{er} volume de la 3^e édition du Traité de physique de M. le Professeur Roiti, et l'Exposé des unités absolues de notre camarade M. Bertolini.

Des remerciements sont adressés à ces donateurs.

M. de Weydlich, Président. — Au nom du Comité, je propose à l'assemblée d'inviter M. le Sénateur Montefiore, fondateur de l'Institut électro-technique, M. le Professeur Eric Gerard, Directeur du même Institut, Sir William Thomson, Professeur à l'Université de Glasgow, M. Cornu, Membre de l'Institut de France, M. Delarge, Directeur-Général des Télégraphes de Belgique à faire partie de l'Association en qualité de Membres honoraires.

Je propose également de conférer à M. Montefiore le titre de Président d'honneur.

Nous aurions voulu proposer aussi une distinction honorifique à l'égard de M. le Professeur Gerard, mais en présence de son intention formelle de n'accepter que le titre de Membre honoraire, votre Comité a bien dû s'incliner.

Ces candidatures se passent de commentaires; aussi ai-je la conviction qu'elles seront unanimement accueillies par l'assemblée. (*Acclamations.*)

M. de Weydlich, Président. — Le Comité vous propose encore d'admettre en qualité de Membre associé M. Cloeren, Chef du service des essais aux usines de bronze phosphoreux de M. Montefiore, à Anderlecht, et MM. De Bast, L'Hoest et moi, celle de M. de Clausonne, Ingénieur aux usines Sautter-Lemonnier en qualité de Membre effectif.

Adopté à l'unanimité.

La parole est ensuite donnée à M. Roosen, Trésorier, pour rendre compte de sa gestion financière, pendant l'année sociale 1889-1890.

M. Roosen, Trésorier. — MESSIEURS,

J'ai l'honneur de vous exposer les opérations financières de l'Association pendant l'exercice écoulé et la situation à la date de ce jour, hormis les dépenses afférentes à l'exercice nouveau, qui d'ailleurs ne comportent qu'une somme très-minime.

Recettes :

En caisse à l'expiration de l'exercice 1888-1889 :

Numéraire	fr.	138 28
Livret de la caisse d'épargne.	»	161 90
Intérêts	»	7 26
Cotisations. — Membres effectifs	»	480 00
» associés.	»	100 00
» temporaires.	»	120 00
Excédents sur mandats (change).	»	2 21
Total.		1009 65

Dépenses :

Remboursement d'avances pour port et divers fait au Secrétariat général . . . »	127 78
Frais de remboursement »	12 00
1 ^{re} Facture Thiriart, impressions et divers. »	538 95
» Corbusier, gravure. »	4 00
» Jaspar, lithographies »	9 00
» Würth, photogravures. »	86 70
2 ^e » Thiriart (impression, port, clichés). »	1048 99
Total. . . »	<u>1827 47</u>

Découvert, par suite de l'excédent des
dépenses sur les recettes » 817 77

Ce déficit résulte de dépenses engagées par le Secrétaire-Général; je laisse donc à celui-ci le soin de vous donner des explications à ce sujet.

M. L'Hoest, *Secrétaire-Général*. — Dans la séance du 26 janvier dernier, répondant à quelques-uns d'entre nous qui exprimaient la crainte bien justifiée que nos ressources ne suffiraient pas aux frais importants d'impression de notre Bulletin, j'ai eu l'honneur de vous dire:

« Je crois pouvoir déclarer que notre signature ne sera
» pas protestée cette année. Une personne qui s'intéresse
» beaucoup à notre Société a bien voulu me le dire.

» L'année prochaine, la question de la cotisation pourra
» être examinée en toute connaissance de cause. »

Cette personne, vous l'avez tous deviné, c'est M. Montefiore qui a voulu étendre à notre Association la sollicitude qu'il a tant de fois témoignée à l'Institut dont on lui doit la fondation.

Se rendant compte, mieux que nous-mêmes, des difficultés financières que nous devons rencontrer dès le début

de notre entreprise, il a voulu nous en épargner le souci en souscrivant, en faveur de notre Cercle, l'engagement de parer à l'insuffisance de nos recettes pendant l'année écoulée. Cette intervention était d'autant plus généreuse qu'elle n'était point limitée et c'était, Messieurs, une preuve de confiance dont votre Comité conservera toujours le souvenir.

Ayant eu l'honneur d'exposer hier à M. Montefiore la situation financière de l'Association, celui-ci m'a remis, pour être inscrite au budget des recettes de l'année passée, la somme de huit cent-cinquante francs qui couvre largement l'excédent de nos dépenses sur nos recettes.

Aujourd'hui, que tous nous avons pu nous convaincre que le nombre et la valeur des travaux qui nous sont communiqués justifient les sacrifices que nous faisons pour leur publication, nous accepterons sans hésiter, je pense, la nécessité d'une majoration de l'annate. Votre Comité prendra prochainement l'initiative d'une proposition dans ce sens, proposition qui vous sera soumise dans la forme statutaire.

A ce sujet, je suis heureux de vous dire que cette majoration pourra, cette année encore, être tempérée par un nouveau don de cinq cents francs souscrit par M. Montefiore, qui m'a autorisé à vous le notifier.

Pour répondre à toutes ces marques d'intérêt, nous ne nous bornerons pas, j'en suis certain, à l'expression de notre gratitude; nous nous efforcerons de plus de conquérir pour notre Association un rang digne de notre Président d'honneur. (*Applaudissements.*)

M. de Weydlich, Président. — Le Comité exprimera à M. le Sénateur Montefiore la reconnaissance de l'Association pour le don généreux qu'il lui a fait. La parole est donnée au Secrétaire-Général pour la lecture de son rapport sur l'exercice 1889-1890.

M. L'Hoest, *Secrétaire Général*. — MESSIEURS,

En conformité de l'art. 7 de nos statuts, j'ai l'honneur de vous exposer la situation actuelle de l'Association et de vous rendre compte des travaux accomplis pendant l'année sociale 1889-1890.

A son origine, notre Société, qui ne pouvait compter qu'un nombre de membres très limité, n'avait d'autre but que d'entretenir entre les anciens élèves de l'Institut Montefiore les relations de camaraderie nouées à cette école spéciale ; dans son programme une place était bien faite aux travaux scientifiques et industriels, mais ce n'était là, en réalité, qu'une aspiration qui devait rester sans résultat marqué, jusqu'au jour où les ingénieurs formés par l'Institut seraient assez nombreux pour constituer une Société de techniciens.

Dans le courant de l'exercice écoulé, vous avez pensé que le moment était venu de réaliser entièrement ce programme et vous avez apporté, à nos statuts, les modifications que la situation nouvelle réclamait.

Comme vous avez pu le constater, les résultats les plus encourageants ont été le fruit de nos efforts et, bien que dix mois à peine se soient écoulés depuis notre réorganisation, il n'est plus douteux pour personne que notre existence est désormais assurée, dans la voie où nous nous sommes engagés.

L'Association qui, au 1^{er} novembre 1889 ne se composait que de vingt-sept membres, en compte aujourd'hui cent quatre, dont soixante-six effectifs, douze associés et vingt-six temporaires. Pour apprécier l'importance de ce résultat, il faut considérer les conditions particulièrement rigoureuses du recrutement de nos membres ; en effet, une disposition formelle de nos statuts n'admet que des électriciens également préparés à l'examen des applications de l'électricité et à l'étude des questions de science pure.

Le nombre et la spontanéité des adhésions ont été, pour nous, un bien précieux encouragement à poursuivre l'œuvre entreprise ; nous en avons eu d'autres auxquels nous n'attachons certes pas moins de prix. Je parlerai d'abord de la part que beaucoup d'entre nous ont prise aux travaux de la Société : en nous réservant des communications que d'autres publications périodiques auraient, sans doute, accueillies avec beaucoup d'empressement, ils ont enrichi notre bulletin de contributions dont le nombre et la portée nous ont déjà valu les félicitations de grandes autorités scientifiques.

Il était de haute convenance de donner ces preuves de vitalité avant que de solliciter le patronage de ceux dont le nom est désormais lié à l'histoire de la science électrique. Une même réserve nous était évidemment commandée à l'égard du fondateur de l'Institut Montefiore et du professeur qui en a créé l'excellent enseignement.

Eh bien, Messieurs, notre reconnaissance nous presse de le déclarer, cet appui que nous ne pouvions encore demander, il nous a été accordé, aussi généreux que discret, et nous devons, en toute justice, lui attribuer une très large part dans le succès dont nous nous félicitons aujourd'hui.

Votre Comité vous a déjà saisi de propositions pour la nomination de membres honoraires ; nous espérons que ceux-là qui, jusqu'à ce jour, nous ont témoigné leurs sympathies d'une manière si efficace, voudront bien accepter le titre honorifique qu'avec l'intention de le leur conférer, nous avons inscrit dans nos statuts.



Se conformant à un usage fort répandu dans les sociétés savantes, notre camarade M. Libert a voulu inaugurer la présidence qui lui avait été conférée, par un discours d'ouverture, dans lequel il a énuméré et discuté les avantages et les procédés de l'application de l'électricité aux

explosions souterraines et spécialement au tir dans les mines grisouteuses. L'auteur a complété ultérieurement son intéressante communication par la description du procédé Manet ; ce procédé, dans l'état actuel, réalise le système le plus parfait pour le tirage des mines dans une atmosphère explosive.

Nous devons à M. Roosen un exposé précis et suffisamment complet des phénomènes mis en évidence par les expériences désormais célèbres du Dr Hertz. Cet exposé, non terminé encore, a été précédé de l'étude analytique des oscillations électriques.

Le même camarade nous a communiqué d'autres notes d'ordre technique qui ont été insérées aux procès-verbaux des séances ou à la chronique du bulletin.

M. Bertemati nous a donné, en mars dernier, quelques détails inédits sur le torpilleur Peral, détails qu'une publication étrangère a mis à profit sans indiquer la source de ses renseignements. Ce camarade nous a envoyé plus récemment un mémoire très étudié sur les conditions électriques et économiques des divers systèmes de distribution directe en dérivation.

Sous le titre trop modeste d'Aperçu de la théorie de la propagation de l'électricité sur les longues lignes à deux conducteurs métalliques, M. Demany a condensé, dans un travail bien coordonné, toutes les connaissances acquises sur ce sujet ; par les considérations et les déductions dont il l'a enrichi, il a su donner à ce travail tout l'intérêt d'une œuvre personnelle et c'est bien avec ce caractère que nous l'avons accueilli. M. Demany nous a exposé aussi une modification à la méthode de Mance dont il est l'auteur et qu'il a eu l'occasion d'appliquer.

Dans la chronique du premier fascicule de notre bulletin, nous avons publié la traduction d'une note que M Bertolini a publiée dans la *Rivista Marittima* sur l'enseignement de l'électro-technique ; avec une fidélité parfaite et un soin scrupuleux du détail, notre camarade y a exposé chrono-

logiquement toute la série de travaux auxquels se livrent les ingénieurs inscrits aux cours de l'Institut Montefiore. Nous tenons du même la rédaction en français d'une note sur une méthode de détermination de la vitesse des projectiles dans l'intérieur d'une arme à feu. Le sujet paraît très spécial à première vue, mais l'auteur a su donner beaucoup d'intérêt à sa communication par la discussion des moyens de mesure et d'enregistrement qu'il met en œuvre.

M. Francken, à ma demande, s'est chargé d'étudier un point d'analyse que je lui avais soumis et qui trouve une application dans la recherche de la position la plus convenable à donner à une station centrale; vous avez pu apprécier avec quel soin et quelle sagacité il s'est acquitté de ce travail.

Nous avons publié l'analyse, faite par l'auteur, d'un mémoire de M. Santarelli sur la loi d'économie dans les conducteurs. Nous aurions donné la traduction in-extenso de ce travail si une revue périodique, *La Lumière électrique*, ne s'était empressée de le faire dès la publication du texte original.

Notre camarade, M. Emile Gérard, qui s'est fait une spécialité de la construction des appareils de précision, nous a entretenus de quelques instruments qu'il a exécutés, à savoir le compteur Tudor, le pyromètre Le Chatelier et l'électromètre apériodique dû à M. Eric Gerard, directeur de l'Institut Montefiore.

M. Henrard, chargé par la C^{ie} Popp de visiter et de commenter les installations de Chelsea, nous a fait part de ses impressions en les accompagnant de données inédites.

M. Mélotte nous a donné une description complète de la nouvelle lampe imaginée par M. Henri Pieper, membre de notre Association.

La détermination du sens du courant induit par le déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique

a fourni à M. Cruciani le sujet d'une note où l'auteur expose un procédé original pour préciser l'orientation relative de la translation mécanique, du courant électrique et du flux magnétique.

Pour être complet, je citerai encore les quelques communications que j'ai eu l'honneur de vous faire en mon nom personnel, savoir l'exposé de l'état actuel de l'application de l'électricité à la soudure des métaux par le procédé du professeur Elihu Thomson, la recherche de l'emplacement de l'usine électrique dans les distributions en dérivation à potentiel constant, et enfin la discussion d'un moyen de faire varier la sensibilité des galvanomètres à équipement tendu.

Je ne puis clore ce rapide aperçu des travaux communiqués dans les onze séances de l'année, sans rendre un hommage légitime au zèle des Secrétaires adjoints au Comité, qui ont alimenté notre chronique de traductions et de comptes-rendus appréciés comme ils le méritent par tous nos lecteurs.

Ici se termine, pour cette année, la mission que m'impose ma charge ; il ne me reste plus qu'à exprimer ma conviction que, forts des résultats obtenus, vous continuerez à réserver à notre œuvre le fruit de votre travail et de votre expérience.

M. de Weydlich, *Président*, ouvre ensuite la série de travaux de l'Association par l'adresse inaugurale suivante :

MESSIEURS ET CHERS CAMARADES,

Le rapport que nous venons d'entendre sur les travaux publiés par notre Association pendant l'année écoulée nous permet de constater que nos réunions, dès qu'elles sont devenues régulières, ont acquis un intérêt et une importance qui doivent inspirer de la confiance dans l'avenir de notre Association et nous laisser espérer

que nos travaux ne manqueront pas d'apporter une part de plus en plus appréciable au progrès de cette science, si féconde en applications aussi surprenantes que variées, à laquelle nous consacrons nos efforts.

Je crois être l'interprète de tous les membres de notre Association en profitant de cette occasion pour adresser nos remerciements bien sincères à notre Secrétaire-général, M. L'Hoest, dont l'initiative, pleine de dévouement, nous a permis d'entrer dans une voie vraiment productive et qui, depuis, n'a ménagé ni son temps ni sa peine pour apporter à la rédaction de notre bulletin un soin aussi minutieux qu'éclairé.

C'est donc avec le courage qu'inspire un heureux début que nous abordons cette nouvelle année de travail, pour laquelle vous m'avez fait l'honneur de me confier la présidence de vos réunions, et, comme, avant d'entreprendre une nouvelle étape, on aime à jeter autour de soi un coup d'œil d'orientation, je crois bien à propos d'inaugurer cette série de séances par un aperçu général sur l'état actuel de la science de l'Electricité et du Magnétisme.

MESSIEURS,

De tout temps grâce à sa tendance synthétique, l'esprit humain s'est efforcé de réduire au minimum le nombre de causes des phénomènes percevables par nos sens. Pour y arriver, on analysait ces phénomènes de façon à pouvoir les ramener à des combinaisons d'autres phénomènes moins nombreux et d'une conception plus simple. En poursuivant cet ordre d'idées, la pensée est finalement amenée aux trois conceptions primordiales, celles de la matière, de l'espace et du temps, qui ne sont plus analysables et sont même, toutes les trois simultanément, indispensables à la notion d'un phénomène quelconque dont l'explication la plus simple est, pour

le moins, de la matière en mouvement. Nous ne pouvons, en effet, concevoir un mouvement sans matière et la matière sans mouvement, n'existerait pas pour nos sens. Par conséquent, la limite extrême de la synthèse dans l'explication de tout phénomène serait de le ramener à une forme de mouvement de matière universelle et unique. Cette solution purement mécanique de tous les phénomènes, dans laquelle même la conception de la force, comme entité indépendante, serait superflue, semblerait être le but final que la physique moderne s'efforcerait d'atteindre

Entre toutes les branches de la physique, celle de l'électricité était restée en arrière dans cette voie, mais elle était la plus jeune et elle peut bien être appelée l'enfant de notre siècle. En effet, si nous nous reportons par la pensée d'un siècle seulement en arrière, nous assistons à la discussion célèbre de Galvani et de Volta, que l'on peut considérer, avec raison, comme l'enfantement de la science de l'électricité, car elle aboutit, précisément à l'aurore de notre siècle, en l'an 1800, à la découverte de la pile par Volta ; ce n'est qu'à partir de cette découverte mémorable que les recherches dans le domaine de l'électricité prirent un caractère vraiment scientifique. Tant que l'on ne connaissait que les effets des charges électriques, toute recherche devait rester stérile, à cause de l'extrême subtilité des phénomènes auxquels elles donnaient lieu ; ce n'est que lorsqu'on put obtenir de l'électricité d'une manière continue, qu'un vaste champ s'ouvrit aux recherches, grâce aux manifestations multiples du courant électrique.

A partir de cette époque, les découvertes dans cette nouvelle science se succédèrent avec une telle rapidité, qu'en moins d'une quarantaine d'années, elle fut connue, au point de vue qualitatif, presque aussi bien que de nos jours.

L'attention des savants fut d'abord attirée par les effets calorifiques, chimiques, lumineux et physiologiques, que produisait le courant électrique; mais bientôt la découverte de l'action du courant sur une aiguille aimantée, due à Oersted, en rapprochant deux genres de phénomènes jusque là séparés, fit époque dans le progrès de la synthèse scientifique.

Immédiatement l'esprit pénétrant d'Ampère s'empara, avec une énergie remarquable, de ce nouveau point de vue; il étudia non seulement les actions des courants sur les aimants, mais fut amené à démontrer les actions des courants entre eux et, par une série de spéculations d'une sagacité incomparable, exprima ces actions en langage mathématique; finalement il arriva à prouver l'identité des actions extérieures d'un courant et d'un feuillet magnétique de même contour et à donner une théorie de la constitution moléculaire des corps magnétiques, basée sur cette identité.

Cette théorie produisit une fusion, presque complète, dans les conceptions des phénomènes électriques et magnétiques. D'autre part, la connaissance des actions électromagnétiques permit de construire des appareils de mesure de l'intensité du courant, dont la relation avec la force électro-motrice et la résistance d'un circuit ne tarda pas à être établie par Ohm; c'est grâce à la sensibilité de ces appareils que Seebeck put observer les courants thermo-électriques. Finalement, cette période de découvertes fut achevée par Faraday, qui reconnut les phénomènes de l'induction.

L'ensemble des faits fondamentaux était donc connu lorsque se fit jour le principe de la conservation de l'énergie, cette gloire de notre siècle, qui donna une impulsion si grande au progrès des sciences physiques. L'énergie absorbée sous une forme, est récupérée sous une autre ou sous plusieurs autres formes; les deux quantités sont égales, ou si elles ne le sont pas, la différence

doit être attribuée à une cause qu'il reste à découvrir. Le principe conduit ainsi à des équations, qui ont donné des résultats importants, surtout dans l'étude de l'électricité, cet agent, par excellence, de transformation de l'énergie sous toutes les formes connues. Grâce à ce principe, la théorie mathématique des phénomènes put être complétée de façon à donner une base certaine aux applications, qui ne tardèrent pas à se multiplier de jour en jour.

Mais cette théorie ne donnait que des relations mathématiques entre des quantités dont la nature restait parfaitement inconnue, car la théorie des fluides, agissant directement et instantanément à distance, commençait à être considérée simplement comme une forme de langage nécessaire pour fixer les idées. Le côté caractéristique de cette théorie était de localiser la cause des actions que l'on observait, uniquement sur les corps, sur lesquels ces actions se manifestaient.

Cependant, encore dans la seconde moitié du dernier siècle, Cavendish avait signalé l'influence de la nature du diélectrique interposé entre les armatures d'un condensateur. Faraday constata cette influence sans connaître les travaux de Cavendish, qui furent publiés il y a une dizaine d'années seulement, par les soins de Maxwell ; ce fait fut le point de départ de ces idées profondes, dont le développement transforma radicalement la conception des phénomènes électro-magnétiques.

Faraday aborda l'étude de ces phénomènes sans opinions préconçues et, ne pouvant s'accommoder de la théorie généralement admise, à cette époque, des actions directes à distance, chercha la transmission de ces actions de proche en proche, par l'intermédiaire du milieu ambiant. L'influence du diélectrique sur la capacité d'un condensateur justifiait cette manière de voir ; d'autre part la loi des inverses carrés, établie par Coulomb

pour les actions électriques et magnétiques, suggérait, au moins au point de vue géométrique, la propagation de ces actions sous forme de flux. Ces considérations amenèrent Faraday à voir dans les forces électriques et magnétiques la seule réalité tangible ; il les vit sous des formes d'état de l'espace, de tensions, de tourbillons, sans pouvoir expliquer encore ce qu'elles pouvaient être réellement. Il lui importait surtout de démontrer que la transmission de ces actions n'était pas instantanée. En effet, s'il parvenait à prouver que l'influence d'une variation électrique éprouve un retard d'autant plus grand que la distance à laquelle on constate cette influence est plus grande, sa théorie de propagation de proche en proche et de l'indépendance des forces aurait triomphé par cela même. Il n'y parvint pas, malgré les efforts de toute sa vie si remplie de découvertes originales, parmi lesquelles il faut encore signaler la relation remarquable qu'il constata entre les phénomènes magnétiques et lumineux, notamment la rotation du plan de polarisation de la lumière dans un champ magnétique.

Cette relation fut le premier indice pour les recherches sur la nature du milieu qui transmet les actions électriques. Depuis que la théorie ondulatoire de la lumière, suggérée encore par Huyghens au XVIII^e siècle, fut définitivement prouvée, au moins dans sa forme géométrique, il devint évident que la lumière étant l'effet d'un mouvement vibratoire, il doit exister une substance remplissant l'espace entier et servant de véhicule à ces vibrations. Cette substance, qu'on appela éther, doit être différente de la matière pondérable, puisqu'elle remplit aussi bien les espaces interstellaires que les espaces intermoléculaires ; sa densité doit être excessivement faible et son élasticité très grande, et quoiqu'on n'ait pas pu évaluer ces quantités séparément, mais seulement leur rapport (qui est égal au carré de la vitesse de propagation des ondes lumineuses), l'existence de cette substance mystérieuse

semble être, pour tout physicien, aussi bien prouvée que celle de la matière pondérable elle-même ; aussi son importance s'affirme de plus en plus dans les phénomènes physiques. Bientôt après l'établissement du principe de la conservation de l'énergie, on reconnut l'identité des phénomènes lumineux avec ceux de la chaleur rayonnante, dont les premiers ne seraient qu'une forme spéciale, caractérisée par des longueurs d'ondes comprises entre des limites relativement restreintes et possédant la propriété particulière d'évoquer dans notre œil l'impression subjective de la vue. Ce nouveau pas vers l'unité des causes attira davantage l'attention des physiciens sur les idées de Faraday, qui trouvèrent enfin dans l'illustre Maxwell un adepte enthousiaste et doué d'une grande puissance analytique.

On sait quelle fut la lueur qui guida Maxwell dans le développement de sa théorie électro-magnétique de la lumière : de l'électricité en mouvement produit des forces magnétiques ; du magnétisme en mouvement produit des forces électriques ; dans la relation qui unit ces deux genres de phénomènes entre donc l'idée d'une vitesse, et la constante qui caractérise cette relation et qu'on retrouve toujours dans la comparaison des unités basées sur les actions électro-statiques et électro-magnétiques est elle-même une vitesse. Cette vitesse a été déterminée pour la première fois par Wilhelm Weber et Kohlrausch par la mesure d'une même quantité d'électricité, successivement par ses effets électro-statiques et électro-magnétiques et a été trouvée sensiblement égale à une autre vitesse déjà connue, celle de la lumière. Cette coïncidence pouvait être fortuite ; elle n'en donnait pas moins une première confirmation de la théorie élaborée par Maxwell.

Dans cette théorie, Maxwell est arrivé à démontrer, en partant des relations générales qu'il avait commencé par établir entre les forces électriques et magnétiques dans un

champ variable d'une manière quelconque, que, dans le cas de variations périodiques du champ, ces équations générales prennent une forme parfaitement analogue à celles qui expriment la propagation des ondes lumineuses; que, par conséquent, une perturbation électro-magnétique périodique se propage par des ondes transversales, dont la longueur peut être quelconque, suivant la durée de la période des perturbations, mais dont la vitesse de propagation est précisément égale à la constante mesurée par Weber et Kohlrausch, c'est-à-dire égale à la vitesse de propagation des ondes lumineuses.

D'autres faits d'expérience ne tardèrent pas à donner à cette théorie une probabilité de plus en plus grande.

Ainsi, d'après cette théorie, le pouvoir inducteur spécifique des corps diélectriques étant inversement proportionnel au carré de la constante, dont je viens de parler, ou au carré de la vitesse de la lumière dans le milieu considéré, devrait être directement proportionnel au carré de l'indice de réfraction de ce milieu, qui est, comme on le sait, inversement proportionnel à la vitesse de la lumière. Cette relation a été vérifiée, surtout pour les liquides et les gaz, par les résultats des expériences effectuées en premier lieu par Gordon et poursuivies par beaucoup d'autres, parmi lesquels M. Boltzmann qui a réussi à mettre en évidence la différence des pouvoirs inducteurs de différents gaz à des pressions variables; ses expériences tendent à démontrer que lorsque la pression diminue indéfiniment, les valeurs des pouvoirs inducteurs de différents gaz s'approchent de plus en plus d'une valeur constante, que l'on peut appeler le pouvoir inducteur du vide ou de l'éther.

D'autre part, les expériences effectuées presque en même temps par M. Duter et M. Righi, et peu après par M. Quincke, au moyen de condensateurs de formes spéciales, avec des diélectriques solides, liquides ou gazeux, vinrent confirmer directement l'hypothèse fonda-

mentale de la théorie de Maxwell, d'après laquelle, dans un champ électrique ou magnétique constant, il existe des tensions suivant les lignes de force et des pressions dans les directions perpendiculaires à ces lignes.

Dans toutes ces expériences, on a observé des variations de volume du diélectrique introduit entre les armatures, et constaté que ces variations sont toujours proportionnelles au carré de la différence de potentiel des armatures et inversement proportionnelles au carré de la distance des armatures, ou en d'autres termes proportionnelles au carré de l'intensité du champ, comme l'indique précisément l'expression théorique de la pression dans un champ électrique. M. Quincke a également vérifié ce phénomène dans le cas d'un champ magnétique.

Des phénomènes inverses ont été constatés par M. Curie, qui, en comprimant longitudinalement un prisme de tourmaline terminé par deux bases perpendiculaires à l'axe, trouva que ces bases accusaient des électrisations de signes contraires. La traction produisait une électrisation inverse de la compression. Le quartz et en général les cristaux doués de l'hémiédrie dissymétrique jouissent de propriétés semblables.

Aux phénomènes de déformation électrique, se rattachent immédiatement les phénomènes de biréfringence observés par M. Kerr dans les diélectriques transparents et homogènes soumis à l'action d'un champ électrique. On sait, en effet, qu'un corps solide, transparent et homogène comme le verre, devient biréfringent lorsqu'on le soumet dans une direction à une traction ou une compression. L'effet electro-optique est encore proportionnel au carré de la différence de potentiel des électrodes entre lesquelles est placé le diélectrique.

Enfin, il y a deux ans à peine, toutes ces recherches pour confirmer les idées de Faraday et la théorie de Maxwell, furent couronnées d'un succès éclatant, grâce aux expériences désormais célèbres effectuées par le

Dr Hertz, qui parvint à démontrer directement que la transmission des perturbations électriques et magnétiques n'est pas instantanée, mais que ces perturbations se propagent effectivement, comme Maxwell l'avait prédit, par des ondes transversales et avec la même vitesse que les ondes lumineuses et sont, comme ces dernières, susceptibles de produire tous les phénomènes de réflexion et d'interférence, de réfraction et de polarisation. Les expériences du Dr Hertz sont déjà trop connues pour que je m'y arrête plus longuement.

On sait que la difficulté principale était de produire des ondes suffisamment courtes pour être mesurées dans les limites d'une salle de laboratoire et que c'est en utilisant les propriétés des décharges oscillantes que le Dr Hertz a réussi à vaincre cette difficulté. La plus courte longueur d'onde, observée par le savant allemand, était de 30 centimètres et correspondait à une période égale à un milliardième de seconde, tandis que la plus grande longueur d'onde du spectre infra-rouge est de 30 millièmes de millimètre seulement, soit 0,0001 de la précédente. L'intervalle entre ces deux ordres de longueurs d'onde n'a encore été exploré par aucun procédé optique ou électromagnétique, mais il n'est point impossible que cette lacune soit bientôt comblée et que l'on relie le spectre électromagnétique aux spectres calorifiques, lumineux et chimiques comme ceux-ci le sont déjà entre eux.

Ainsi, l'identification de la lumière et de l'électricité, prévue par le génie de Maxwell, est désormais établie; elle est devenue perceptible à nos sens, intelligible à l'esprit. Tout le domaine de l'optique se trouve de la sorte annexé à l'électricité, qui devient ainsi, d'après l'expression du professeur Lodge, une science impériale

L'importance de l'œuvre de Maxwell ne se borne pas là; l'ensemble des équations qu'il a établies a une portée tellement générale, qu'il permet de résoudre un problème quelconque de distribution électrique permanente ou

variable pour un système de conducteurs et de diélectriques donné. M. Heaviside en a déjà fait une application très remarquable à la transmission des ondes électriques dans les câbles sous-marins. M. Hertz lui-même a montré dernièrement comment on peut déduire de ces équations toutes les lois connues de l'électro-statique, de l'électromagnétisme et de l'induction.

Le contraste le plus caractéristique de la nouvelle théorie avec celle des actions à distance consiste en ce que, selon cette dernière, comme je l'ai déjà signalé, les causes des phénomènes électriques et magnétiques étaient entièrement localisées dans les conducteurs, tandis que, d'après la nouvelle théorie, il faudrait rechercher ces causes uniquement dans le diélectrique ambiant.

Ainsi, selon l'ancienne conception, le courant électrique serait analogue au mouvement d'un liquide dans un tuyau dû, par exemple, à une différence de niveau aux extrémités du tuyau, ou à la poussée d'un piston. Dans le nouvel ordre d'idées, on doit se figurer ce mouvement comme produit par le déplacement du tuyau même, qui entraînerait le liquide par suite de la viscosité de ce dernier. Cette analogie a été proposée par Sir William Thomson, qui en a fait une application très intéressante au calcul de l'augmentation de la résistance électrique des conducteurs traversés par des courants alternatifs; en effet, dans ce cas, on peut se figurer la distribution des intensités du courant dans une section du conducteur, comme analogue à celle des vitesses (ou à une fonction de la vitesse), du liquide visqueux dans une section du tuyau, lorsque celui-ci aurait un mouvement de va-et-vient. On conçoit facilement que dans ce cas les vitesses iraient en décroissant de la périphérie à l'axe, où elles pourraient même être nulles: plus la durée de la période serait courte et plus grand serait le diamètre du conducteur, plus le phénomène tendrait à se localiser dans une couche périphérique de plus en plus mince, de sorte qu'à la limite la conductibilité

électrique n'augmenterait plus proportionnellement à la section ou au carré du diamètre, mais proportionnellement à la périphérie, c'est-à-dire à la première puissance du diamètre.

Pour généraliser les applications de cette théorie du fluide visqueux, qui a le précieux avantage de nous donner une représentation tangible de ce qui se passe dans le conducteur aussi bien que dans le diélectrique, il faut simplement, d'après Sir W. Thomson, remplacer tous les corps par des fluides, d'une densité proportionnelle à leur conductibilité électrique et d'une viscosité égale pour tous.

Cependant cette théorie, qui est excellente au point de vue mathématique, ne doit nullement être considérée au point de vue physique. Ainsi, l'analogue de l'intensité du courant ne serait pas précisément la vitesse du fluide; en effet, si nous considérons le cas d'un courant permanent c'est-à-dire le mouvement provoqué dans le fluide visqueux par le déplacement du tuyau toujours dans le même sens, la vitesse ne sera pas la même dans une section transversale, mais décroîtra suivant une loi parabolique, de la périphérie à l'axe. L'analogue de l'intensité du courant qui, dans ce cas, est constante dans toute la section, ne serait pas la vitesse en chaque point, mais la seconde dérivée de la vitesse par rapport à la distance du point considéré à l'axe du tuyau. La valeur de cette dérivée est en effet constante pour tous les points d'une même section transversale.

Du reste, Sir W. Thomson le dit lui-même, plus on examine cette théorie de près, plus la trouve-t-on en défaut au point de vue physique; ainsi dans le fluide visqueux, l'énergie est transformée en chaleur proportionnellement au carré de la première dérivée de la vitesse, c'est-à-dire que le dégagement de chaleur augmente proportionnellement au carré de la distance à l'axe, tandis que dans le cas d'un courant électrique, la chaleur est

dégagée uniformément dans toute la section ; l'énergie serait également consommée et la chaleur dégagée dans le fluide visqueux de densité nulle, qui d'après cette théorie représente le diélectrique parfait, ce qui est complètement inadmissible.

Néanmoins, malgré les discordances physiques, cette théorie est excessivement utile, car elle nous aide à saisir, pour ainsi dire d'un coup d'œil, les résultats géométriques de tous les problèmes électro-magnétiques, auxquels les équations de Maxwell ne permettent d'arriver qu'après des calculs excessivement pénibles.

Les équations de Maxwell, malgré toute leur généralité, ne peuvent cependant pas être appliquées aux phénomènes magnétiques proprement dits, c'est-à-dire aux phénomènes d'aimantation tels qu'on les observe dans les trois métaux fortement magnétiques : le fer, le nickel et le cobalt. Ces équations tiennent compte, il est vrai, de la perméabilité magnétique des corps, mais elle y est considérée comme constante et pour la supposer variable (ce qui rendrait la solution excessivement compliquée) il faudrait d'abord connaître la loi de cette variation. Sous ce rapport, la théorie des phénomènes magnétiques est restée en arrière relativement à celle de l'électro-magnétisme et de l'induction.

La première théorie moléculaire de l'aimantation, proposée par Poisson, supposait simplement que l'influence d'une force magnétisante consistait dans la séparation de deux fluides de polarité différente dans chaque molécule, dont la position restait absolument invariable. Cette théorie, de laquelle Poisson donne un beau développement mathématique basé sur la loi de Coulomb, est suffisante pour l'étude des phénomènes dans un état statique d'aimantation, mais ne donne aucun indice des phénomènes que l'on observe lorsque l'aimantation varie. Elle ne permet nullement de prévoir, ni la variation de la perméabilité avec la force magnétisante, ni la satura-

tion magnétique, ni aucune connexion entre l'aimantation et les autres propriétés d'un corps magnétique, ni enfin pourquoi ces corps perdent brusquement leurs propriétés magnétiques lorsqu'on atteint une certaine température.

La théorie proposée par Weber fut un progrès notable. Les intensités d'aimantation des molécules d'un corps magnétique sont supposées invariables et les variations de l'aimantation résultante que l'on observe, ne seraient dues qu'à des différences dans l'orientation de ces molécules sous l'influence de la force magnétisante. Cette théorie indique nettement la saturation, qui est nécessairement atteinte lorsque toutes les molécules sont orientées dans le même sens. Elle permet de concevoir les variations de la perméabilité et le phénomène de l'hystérésis par la considération des résistances à l'orientation des molécules analogues aux frottements, sans cependant en donner une explication bien précise; quant aux phénomènes qui accompagnent les changements de température on ne pourrait les expliquer, par la théorie de Weber, qu'en admettant que l'intensité d'aimantation des molécules diminue lorsque la température croît et qu'en même temps elles sont rendues plus mobiles.

La théorie suggérée par Ampère ne contredit en rien celle de Weber; au contraire, elle peut être considérée comme le perfectionnement de celle-ci. Elle explique les propriétés magnétiques des molécules par des courants électriques circulant autour de ces molécules dans des circuits sans résistance. Le grand mérite de cette théorie comme j'ai déjà eu l'occasion de le dire, est surtout, dans sa portée synthétique. On peut remarquer cependant qu'elle fait apparaître une anomalie: en effet, lorsque le fer perd ses propriétés magnétiques à la température critique, nous devons supposer que les courants moléculaires s'annulent; or, ces courants représentent une énergie; on devrait donc s'attendre à avoir en ce moment un dégagement de chaleur latente, mais le phénomène de recalescence accuse justement le fait inverse.

Enfin, tout récemment, le professeur Ewing a donné une belle illustration à la théorie de Weber, au moyen de laquelle il parvient à donner une explication bien claire de tous les phénomènes observés. On pourrait comparer la méthode d'investigation, imaginée par le professeur Ewing, à l'emploi d'un microscope suffisamment puissant pour nous permettre de voir les molécules mêmes d'un corps magnétique. Comme la traduction de l'importante communication faite à ce sujet à la Royal Society de Londres, vient de paraître *in extenso* dans notre Bulletin, je me bornerai à constater que, grâce à sa méthode, le professeur Ewing démontre que les forces magnétiques intermoléculaires suffisent complètement pour rendre compte de tous les phénomènes qui caractérisent l'aimantation, sans avoir recours à des résistances analogues au frottement ou à des forces quasi élastiques proposées par Wiedemann.

Je ne puis m'empêcher, cependant, de signaler l'hypothèse originale par laquelle le professeur Ewing explique la variation de l'aimantation avec la température et notamment le phénomène de désaimantation. L'accroissement rapide de la perméabilité avec la température, dans le cas des faibles forces magnétisantes, est facilement explicable par la dilatation qui, en écartant les aimants moléculaires, diminue leur stabilité et par conséquent accélère leur orientation suivant la direction de la force magnétisante. Mais en même temps, d'après le professeur Ewing, on peut admettre que les aimants moléculaires ont toujours un mouvement oscillant autour de leurs centres de gravité et l'amplitude de ces oscillations augmenterait avec la température jusqu'à ce que, arrivés à la température critique, ces mouvements oscillants se transforment dans des mouvements de *rotation*; il est évident qu'alors toute trace de polarité doit disparaître. Cette hypothèse s'accorde également avec le fait que, dans le cas de grandes forces magnétisantes, la température réduit la perméabilité, car alors les aimants moléculaires

sont déjà orientés de façon que leurs directions moyennes sont presque parallèles à la direction de la force magnétisante, de sorte que la dilatation n'a plus d'influence sensible sur leur stabilité et l'augmentation des amplitudes des oscillations réduit la valeur moyenne de leur moment magnétique suivant la direction de la force magnétisante. Cette hypothèse, très remarquable, supprimerait également l'anomalie que j'ai signalée à propos de la théorie d'Ampère, sans nullement porter atteinte à cette dernière. En effet, à la température critique, la transformation des mouvements moléculaires oscillants en mouvements de rotation doit absorber de l'énergie; la transformation inverse doit en dégager comme le prouve le phénomène de recalescence.

Toutes ces théories, toutefois n'expliquent pas encore cette exception fondamentale que présentent le fer, le nickel et le cobalt dans la continuité, à laquelle la considération d'autres phénomènes de la nature nous a habitués. Il se peut que, d'après une idée émise encore par Faraday, les autres métaux deviendraient également magnétiques à des températures suffisamment basses. Les expériences effectuées par le docteur Hopkinson sur les alliages du nickel et du fer offrent d'intéressantes indications à cet égard et si des recherches poussées dans cette voie confirmaient cette hypothèse, ce serait une nouvelle conquête à enregistrer dans le progrès, déjà si remarquable, que la science électro-magnétique a apporté à la synthèse des phénomènes physiques.

On est encore loin de l'explication idéalement mécanique, qui serait la limite ultime à laquelle nous puissions espérer d'atteindre: mais les progrès prodigieux, accomplis depuis un quart de siècle à peine, prouvent au moins la possibilité d'une solution mécanique. Pour y arriver, il faudrait d'abord connaître la structure intime de cette substance impondérable, dont l'existence ne peut plus être mise en doute et dont la considération est

tellement séduisante, que sir W. Thomson aurait exprimé la possibilité que les atomes de la matière pondérable elle-même, dans toute sa variété infinie, ne soient que des modalités de l'éther en mouvement.

L'éther en mouvement expliquerait donc tout.

Mais, la preuve de la possibilité d'une explication mécanique n'est pas encore l'explication même. La tentative, faite par Maxwell, de concevoir et de montrer le fonctionnement d'un mécanisme capable de produire une connexion mécaniquement équivalente à celle qui relie effectivement les parties du champ électro-magnétique, n'est que la démonstration de la possibilité d'en imaginer un; mais, en réalité, comme il le dit lui-même, le problème comporte une infinité de solutions, parmi lesquelles, cependant, il ne doit y en avoir qu'une vraie. Quelle est-elle? Peut-elle être suffisante pour permettre de s'affranchir de la conception de la force, même réduite à des actions entre les particules de l'éther, et expliquer jusqu'à la gravitation universelle par des poussées ou des chocs entre ces particules en mouvement? (*) Il serait bien

(*) Cet idéal absolument matérialiste a donné lieu à des interprétations que je crois nécessaire de rectifier. Je dois d'abord faire remarquer que je n'ai pas eu l'intention de m'écarter du domaine des sciences exactes pour entrer dans celui de la philosophie. J'ai voulu dire simplement, qu'en poursuivant l'ordre d'idées suggéré par Faraday, c'est-à-dire en voulant s'affranchir des forces agissant directement à distance, la science, pour rester conséquente avec elle-même, doit tendre à s'affranchir également de la conception de la force, qui reste aussi bien incompréhensible entre deux particules d'éther, qu'entre deux astres. Le but final dans cette voie est donc nécessairement matérialiste. Mais il ne faut pas oublier que nous avons en vue uniquement l'explication objective des phénomènes, sans toucher en aucune façon tous les phénomènes subjectifs par lesquels se manifeste la vie, tels que les sensations, la pensée, la conscience de notre existence, etc., qui sont en dehors du domaine des sciences exactes.

Pour être plus explicite, prenons un exemple: la science nous apprend que le son ou la lumière sont dus à des mouvements de l'air ou de l'éther, mais elle ne dit pas pourquoi ces mouvements produisent la sensation du son ou de la lumière; en admettant même qu'elle arrive à expliquer comment ces mouvements, après avoir frappé les organes de nos sens, se transforment en des mouvements moléculaires dans les nerfs, qui à leur tour évoquent un état dynamique correspondant dans notre cerveau, ce sera tout ce qu'elle pourra dire; son rôle sera fini, puisque le côté objectif du phénomène sera complètement expliqué. Quand à la liaison entre le phénomène objectif et la sensation subjective qu'il évoque dans un être vivant, la science exacte n'a pas à s'en occuper.

téméraire de le préjuger, car, hélas ! que savons-nous jusqu'à présent des propriétés de cette substance, sur laquelle nous fondons tant d'espérances ? Nous en connaissons seulement la vitesse de propagation des vibrations de ses particules et nous savons que ces vibrations sont transversales par rapport à la direction de la propagation, c'est-à-dire que l'éther doit avoir les propriétés d'un corps solide. . . Mais quelle idée pouvons-nous nous faire d'un solide, dont la subtilité est telle, qu'il n'entrave nullement les mouvements des corps pondérables qui se déplacent dans son sein, et qui, cependant, est suffisamment tenace pour supporter des tensions dépassant 100 kilogrammes par centimètre carré, comme celles que le professeur Ewing a obtenues entre deux pièces de fer doux ? Ce sont là des questions aussi inexplicables que toutes celles auxquelles se heurte l'esprit humain, chaque fois qu'il essaye de pénétrer jusqu'au fond des choses, car l'infiniment petit aussi bien que l'infiniment grand sont en dehors du domaine de la science, et, si l'on voulait représenter, par un symbole géométrique, le progrès de la science, on l'assimilerait à une spirale logarithmique, qui d'une part s'éloigne indéfiniment vers l'infini, d'autre part, s'approche indéfiniment de son pôle, sans jamais atteindre ni l'un ni l'autre.

Dans ce progrès incessant, la science de l'électricité et du magnétisme, qui naguère encore restait en arrière des autres sciences physiques, semble maintenant vouloir, non seulement les devancer, mais se les annexer en les expliquant toutes, de sorte qu'on peut dire, avec sir W. Thomson : « Dites-moi ce qu'est l'électricité et je vous dirai tout le reste ! » (*Applaudissements prolongés*).

M. Eric Gerard. — Je félicite vivement M. le Président pour l'admirable adresse qu'il vient de prononcer. Il nous a guidé avec une sûreté et une science consommées le long

des méandres de la spirale logarithmique qui, suivant son heureuse expression, représente le domaine actuel de nos connaissances physiques et nous a fait sonder les abîmes que nous réservent les extrémités de cette ligne symbolique. Notre Association doit s'honorer de provoquer des travaux tels que celui par lequel M. de Weydlich a ouvert la nouvelle année sociale.

M. L'Hoest, *Secrétaire Général*. — En l'absence de M. du Welz, j'exposerai brièvement à l'assemblée le contenu d'une note que ce camarade nous envoie sur les résultats de l'accouplement de deux dynamos Compound, sujet qu'il a eu déjà l'occasion de toucher dans une séance précédente.

Mise en quantité de deux dynamos Compound.

L'accouplement en quantité de deux dynamos compound est chose relativement peu fréquente, parce que, ces machines n'étant guère utilisées que dans les installations privées, leur importance comporte rarement l'emploi de deux générateurs. Néanmoins ce cas peut se présenter lorsque, par exemple, par un surcroît de précaution, on tient à avoir une dynamo de réserve, ou que, à certaines heures, l'éclairage n'implique pas le fonctionnement de deux machines. Dans cette dernière occurrence, il est toujours désirable que le travail d'une usine ne soit pas arrêté par une défaillance de lumière, de quelque courte durée d'ailleurs qu'elle puisse être : la mise en marche de la seconde dynamo doit donc pouvoir se faire sans hésitation, sans difficulté et surtout sans arrêt de la première.

Ce problème se trouverait tout résolu par le choix de deux shunts dynamos, dont la mise en quantité est chose universellement employée. Mais outre que l'adjonction de

la seconde machine sur le circuit déjà alimenté par la première suppose certaines précautions et réclame un ouvrier expérimenté — élément qu'on ne trouve pas encore dans toutes les usines — il me semble que le compoundage du générateur de courant est un désideratum pour une installation industrielle, où foyers et incandescences sont alimentés par les mêmes circuits.

Les essais que la Société « Electricité et hydraulique » a effectués dans ses ateliers à Charleroi, ont porté sur deux dynamos Dulait, à enroulement compound. Les deux machines furent montées côte à côte sur le plancher d'épreuve et reçurent leur mouvement d'une transmission commune actionnée par une machine à vapeur.

Pour obtenir le régime normal de marche, on fit tourner les deux dynamos pendant plusieurs heures, au maximum de charge, respectivement sur deux circuits séparés. Les caractéristiques extérieures ne furent relevées qu'après que les divers enroulements eurent atteint leur chaleur de régime. Les deux tableaux ci-après (I et II) donnent les chiffres relevés respectivement pour chacune des deux machines A et B, excitées successivement en long shunt et en court shunt.

TABLEAU I. — DYNAMO A.

En long shunt			En court shunt		
E_a	I_a	T	E_a	I_a	T
64	0	475	59	0	475
78	48	»	74	50	»
79	110	»	77	115	»
79	138	»	79	235	»
79	200	»	74	320	»
78	260	»	70	400	»
75	310	»	»	»	»
72	340	»	»	»	»
70	390	»	»	»	»

TABLEAU II. — DYNAMO B.

E_b	I_b	T	E_b	I_q	T
62	0	475	55	0	475
80	50	»	77	50	»
81	110	»	78	110	»
78	215	»	77	200	»
76	240	»	73	290	»
74	307	»	71	360	»
69	380	»	66	400	»
64	400	»			

Pour la mise en quantité, je fis exécuter les connexions indiquées dans le schéma de la fig. 1. Les deux dynamos restèrent couplées en longue dérivation, mais le balai négatif de chacune d'elles fut relié à l'enroulement en série de l'autre, de façon à provoquer l'excitation mutuelle du gros fil.

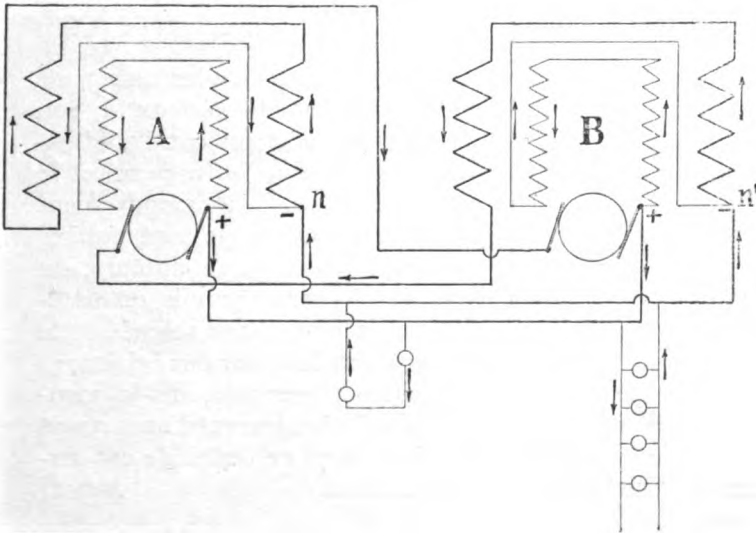


Fig. 1.

Les deux machines du même type, et d'une puissance de 26 kilowatts ($65^v \times 400^A$), se comportèrent fort bien: leur débit commun atteignit facilement les 800 ampères exigés et la constance des volts fut aussi plus grande, quoique, à dessein, elles eussent été choisies à caractéristique fort irrégulière.

Plus tard, des essais analogues, effectués avec le même genre de dynamos, mais à un potentiel de 120 volts, donnèrent aussi des résultats fort concluants. Et, en effet, si l'on se reporte au schéma donné plus haut, qu'on suit le sens des flèches indiquant la marche du courant, on ne rencontre vraiment qu'un seul point critique où le courant pourrait subir une inversion de sens: c'est à la borne négative extérieure ($n\ n'$). Mais si l'on remarque que les connexions en ce point restent les mêmes qu'avant l'adjonction de la seconde machine, et que la variation de fem , s'il y en a une, est en tous cas insuffisante à provoquer dans le fil dérivé (d'ailleurs de loin plus résistant que le gros fil tendant à maintenir la polarité primitive de la machine) une inversion de courant, on s'aperçoit aisément que les résultats pratiques devaient être d'accord avec les prévisions théoriques.

Mais tout concluants qu'en puissent être les essais, ce couplage offre néanmoins un obstacle sérieux à son emploi journalier, car il implique constamment l'abaissement des balais aux deux dynamos, et par suite le mouvement des deux machines. C'est là un inconvénient qui, dans certaines applications, peut à juste titre motiver son rejet. Il est vrai que par un jeu de commutateurs, on éluderait ce point, mais le prix de ces appareils en matériaux relativement coûteux, de fabrication soignée et de dimensions déjà passablement grandes pour des éclairages justifiant une couple de dynamos, leur prix, dis-je, viendrait grêver les frais de premier établissement d'un surcroît de dépense toujours à éviter dans ce temps de concurrence et de bon marché à outrance.

Pour éluder ce point critique, j'eus l'idée d'adopter le mode d'accouplement préconisé par M. Mordey et consistant à réunir les deux machines par un pont. A cet effet, la borne non active de chacune d'elles fut reliées aux extrémités d'un même câble, tel que le présente le schéma de la fig. 2.

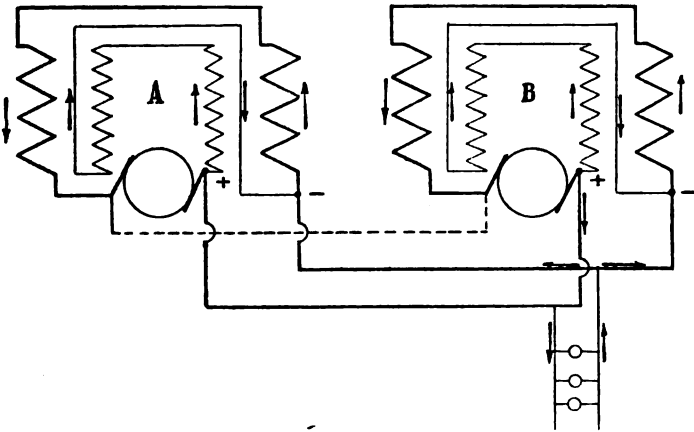


Fig. 2.

Les essais furent effectués sur les deux mêmes machines déjà citées plus haut et dont les caractéristiques sont connues. Les résultats en sont consignés dans le tableau III.

TABLEAU III.

I_a	I_b	I_t	E	A	B
110	»	230	74	475	475
130	»	270	76	»	»
150	»	320	76	»	»
175	»	350	76	»	»
200	180	380	76	»	»
215	205	420	73	»	»
245	230	475	73	»	»
285	265	550	73	»	»

N.-B. — Les volts furent relevés aux points de jonction du circuit extérieur.

Les colonnes I_a , I_b , I_t , indiquent respectivement le débit des dynamos A et B, et le débit total mesurés au moyen d'ampéremètres intercalés dans le circuit; la 4^e colonne donne la tension mesurée à la naissance du circuit extérieur et les chiffres de A et B donnent les vitesses par minute des deux dynamos, vitesses prises égales dans ce premier essai. A peu de chose près, les débits des deux machines sont concordants: les écarts peuvent être attribués à de minimes différences dans les enroulements et par suite dans la résistance des différents circuits; aussi dans les différentes connexions ou la qualité des matériaux employés. On voit que la dynamo A débitant moins au début que B, se comporte tout autrement lorsque son courant atteint 175 ampères. A quoi attribuer ce phénomène, sinon à la différence de tension des deux machines? Les caractéristiques en long shunt (tab. I et II) nous montrent, en effet, que jusque 150 à 180 ampères, la *fem* de B l'emporte sur celle de A; à partir de ce point, le contraire se produit jusqu'à la limite de charge des deux machines. Il en résulte que le câble auxiliaire jeté pour maintenir la constance de potentiel entre les deux bornes qu'il relie, est le siège d'un courant

provoqué par la différence de $f e m$ des deux machines. Ce courant varie de sens suivant que E_a , E_b est positif ou négatif.

Voulant pousser plus loin encore les essais précédents, je provoquai artificiellement une notable différence de tension entre les deux machines à l'essai, en diminuant la vitesse de A d'une trentaine de tours. Une nouvelle caractéristique fut relevée (tableau IV), toujours en longue dérivation, à 445 tours.

TABLEAU IV.

E_a	I_a	T
40	0	445
61	50	»
65	100	»
66	208	»
65	285	»
60	380	»

L'accouplement en quantité des deux machines me donna dans ce cas les résultats consignés au tableau V. On en déduira les mêmes conclusions que plus haut, avec cette remarque complémentaire que la $f e m$ résultante reste la moyenne des $f e m$ individuelles des deux machines, à peu de chose de près du moins, et la minime différence trouvait facilement sa raison d'être dans les observations mentionnée, plus haut.

TABLEAU V.

I_a	I_b	I_t	E	A	B
130	110	240	70	445	475
235	175	410	70	»	»
330	280	610	68	»	»
0	0	0	52	»	»

Après ces essais fort satisfaisants, un point restait à élucider. Chaque dynamo pourrait-elle, éventuellement, en maintenant ce couplage, continuer à fournir individuellement le courant normal lui demandé? Pour arriver à cette solution, le moyen était facile: il suffisait de relever à tour de rôle les balais des deux machines. C'est ce qui fut réalisé et avec plein succès. Plusieurs fois, le débit total fourni par les deux dynamos jumellées fut brusquement transporté sur l'une seule d'entre elles, et jamais rien d'anormal ne se produisit. Le tableau VI mentionne les résultats de ces expériences.

TABLEAU VI.

I_a	I_b	I_t	E	A	B	
0	0	0	52	445	475	balais de A et B abaissés.
0	»	0	40	»	»	balais de B levés.
100	»	100	53	»	»	» » » »
45	55	100	65	»	»	» de A et B abaissés.
215	165	380	67	»	»	» » » » » »
»	150	150	50	»	»	» de A levés.
250	»	260	48	»	»	» de B »
325	275	600	65	»	»	» de A et B abaissés.

N.-B. — Ces expériences se sont prolongées toute une après-midi.

Comme conclusion de ces divers essais, il est à noter que :

1° La mise en quantité de deux dynamos compound, même de *f e m* différente, est possible et éminemment pratique même industriellement parlant.

2° Cet accouplement, obtenu par l'excitation mutuelle du gros enroulement des deux machines, conduit à des

résultats très satisfaisants, mais exige le fonctionnement simultané des deux dynamos ou le placement de commutateurs relativement onéreux.

3° L'accouplement Mordey conduit à d'excellents résultats et semble remplir le desideratum de ce mode de jonction, tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique, quoique cependant il tende à diminuer le rendement de la machine à *f e m* la plus élevée.

M. L'Hoest, *Secrétaire Général*. — J'ai reçu aussi une note de M. Centurione sur l'établissement des réseaux de distribution. M. De Bast, qui a bien voulu se charger de vous exposer ce travail, en donnera communication dans la prochaine séance.

M. de Weydlich, *Président*. — Le dernier objet à l'ordre du jour est la nomination d'un troisième commissaire, en exécution de l'article 5 § 1 des statuts.

M. Arendt. — Je vous proposerai, Messieurs, une candidature qui, je pense, réunira toutes les sympathies; c'est celle de M. Libert, notre ancien président, dont nous avons tous apprécié les services rendus à l'Association.

M. Libert est élu commissaire à l'unanimité. (*Applaudissements.*)

La séance est levée à midi et un quart.

SÉANCE DU 14 DÉCEMBRE 1890.

Présidence de M. de Weydlich, Président.

Ont signé la liste de présence : MM. Bayet, Chantraine, Colard, De Bast, Demarteau, Gérard Emile, Gerard Eric, Grottendieck, Hauman, Larmoyer, L'Hoest, Libert, Mélotte, Roosen, de Weydlich et du Welz.

Le Secrétaire-Général propose à l'assemblée de remettre à la prochaine réunion l'approbation du procès-verbal de la séance du 30 novembre, le temps ayant fait défaut pour l'impression de ce document avant la séance de ce jour.

Adopté.

M. de Weydlich, *Président*, rend compte à l'assemblée de la démarche faite par une délégation du Comité, auprès de M. le sénateur Montefiore et de M. le professeur Gérard pour leur offrir les titres honorifiques votés dans la dernière séance. Il est heureux d'annoncer à l'assemblée que ces Messieurs ont gracieusement accédé à la demande qui leur était faite, en accordant l'appui de leur patronage à notre Association.

Le Secrétaire-Général dépose sur le bureau les publications échangées : il donne ensuite lecture de deux lettres, par lesquelles M. Cornu, membre de l'Institut, et M. Delarge, directeur général des télégraphes, acceptent, en termes flatteurs pour l'Association, le titre de membre honoraire qui leur a été offert.

M. de Weydlich, *Président*, notifie la nomination de M. Colard, en qualité de Secrétaire-adjoint au Comité.

La parole est ensuite donnée à M. De Bast pour l'exposé de la note de M. Centurione intitulée :

De la distribution du courant dans les réseaux de conducteurs.

Un problème pratique qui se pose bien souvent à l'électricien est l'étude d'un réseau de distribution urbain.

Parmi les questions qu'il s'agit alors de résoudre, se rencontrent les suivantes :

1° Déterminer la répartition du courant dans les différentes parties du circuit et en déduire les pertes de charge maxima en volts ;

2° Etudier l'influence qu'exerce sur le réseau entier une brusque variation du débit se produisant dans une de ses parties, comme c'est le cas lorsqu'on allume d'un coup toutes les lampes de vastes établissements, tels que des théâtres, etc.

Une solution très générale et néanmoins très simple de ces problèmes a été donnée par MM. Herzog et Stark (*) : on l'a appelée, d'après l'opération caractéristique qu'elle comporte, la méthode de *sectionnement*.

Ayant eu moi-même bien souvent l'occasion d'appliquer ce procédé, je crois pouvoir être utile à mes camarades en développant ici, le plus clairement possible, ses différentes opérations.

Soit en A (fig. 1) le point d'arrivée du courant électrique dans un réseau fermé de distributeurs raccordés entre eux en des points A, B, C, D, E.

Nous ne considérons que les conducteurs d'aller, dont il suffit d'ailleurs de doubler les résistances pour tenir compte du circuit complet. Admettons que les longueurs soient exprimées en mètres et les sections en millimètres carrés. Ces sections sont choisies à l'avance par l'électricien, telles que le courant qu'il présume qu'elles recevront, ne produise en aucun point du réseau un écart de la différence de potentiel supérieur à 2 ou 3 % de la tension utile.

(*) *Lumière électrique* 1890.

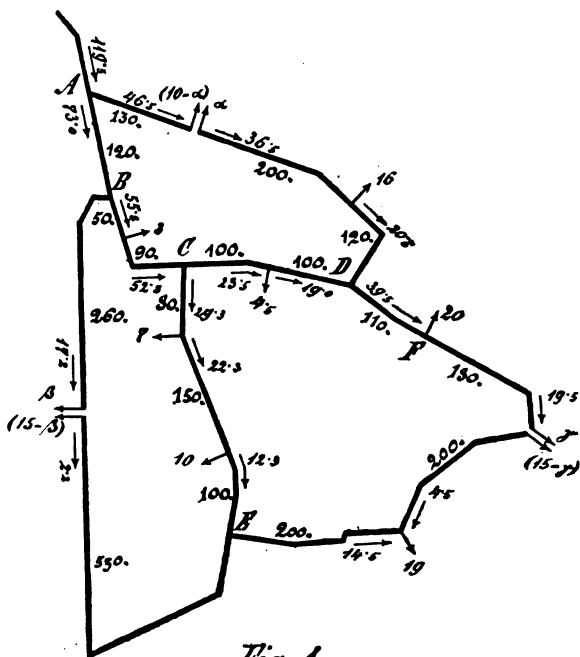


Fig. 1.

C'est précisément ce choix arbitraire qu'il s'agit de vérifier par le calcul en déterminant avant tout la distribution effective du courant dans le réseau.

Voici la manière d'opérer :

On coupe, par la pensée, toute maille fermée en un point quelconque satisfaisant à la condition que chacun des bouts sectionnés reste en communication électrique avec la source de courant.

On suppose alors qu'en ce point il y a autant de dérivations que de bouts de conducteurs coupés et l'on évalue les pertes de potentiel, à partir d'une origine fixe jusqu'au point de sectionnement, le long de chacun des conducteurs qui aboutissent à ce dernier.

En écrivant l'égalité de ces pertes de charge et en appliquant la règle à tous les points de sectionnement, on obtient autant d'équations qu'il y a de mailles ; les racines, que fournit la résolution du système, représentent, en grandeur et direction, les valeurs des courants inconnus dérivés aux points de sectionnement.

Faisons une application au circuit de la fig. 1.

Soient α , β , γ les points de sectionnement : les flèches perpendiculaires aux conducteurs indiquent l'emplacement et les chiffres qui les accompagnent, l'intensité en ampères, des dérivations correspondant à des groupes de lampes.

Comme nous avons choisi en α précisément un point où il y avait une dérivation de 10 ampères, nous pouvons admettre que ces 10 ampères étaient constitués d'une partie α venant de D et d'une partie $10 - \alpha$ émanant de A.

De même en β , le courant dérivé de 15 ampères provient d'une somme de deux parties, β issue de B et $15 - \beta$ de E. La même chose existe pour le point γ .

De A jusqu'au sectionnement α , nous pouvons calculer les pertes de potentiel le long des 2 chemins A, $10 - \alpha$ et A, B, C, D, α , et poser leur égalité.

La conductibilité du métal et le facteur de multiplication z qui tient compte du distributeur de retour intervenant dans les deux membres, nous nous abstenons de les écrire ; en outre, au lieu des longueurs et des sections, nous indiquerons directement les valeurs du rapport de ces quantités.

En admettant que les conducteurs aient les sections suivantes exprimées en m^2 :

$$\begin{aligned} A \alpha D &= 50 \\ A B C &= 70 \\ C D F &= 50 \\ F \gamma &= 30 \\ C E &= 30 \\ B \beta E \gamma &= 20, \end{aligned}$$

et que les longueurs, en mètres, soient celles inscrites sur la figure, nous pouvons écrire pour le point α l'équation :

$$2,6(10-\alpha)=1,71\beta+2,42\times 3+3,7(7+10+19+15-\gamma+15-\beta) \\ +5,7\times 4,5+7,7(20+\gamma)+10,1\times 16+14,1\times \alpha.$$

Vers β , nous avons, à partir de B, les deux chemins B β et B, C, E, $(15-\beta)$ qui nous fournissent l'équation :

$$13\times\beta=0,71\times 3+1,99(4,5+16+\alpha+20+\gamma) \\ +4,65\times 7+7,65\times 10+10,98(19+15-\gamma)+37,48(15-\beta).$$

De même, pour γ , en partant de C

$$2\times 4,5+4(16+\alpha)+6,2\times 20+12,2\gamma=2,66\times 7+5,66\times 10+9 \\ (15-\beta)+19\times 19+29(15-\gamma).$$

En résolvant ces trois équations, nous obtenons

$$\begin{aligned}\alpha &= -36,5 \\ \beta &= 17,2 \\ \gamma &= 19,5\end{aligned}$$

La valeur négative représentant une intensité de sens contraire à celui supposé, le courant α s'éloigne du point désigné par la même lettre au lieu d'y fournir une dérivation.

A l'aide de ces trois données, la répartition du courant est précisée. On connaît ainsi le sens et l'intensité de celui-ci dans chaque portion du réseau : les valeurs sont inscrites sur la figure à côté des flèches parallèles aux conducteurs. Il est alors très aisé de déterminer les pertes en volts.

Si celles-ci, ou la densité du courant sont trouvées trop fortes dans quelques conducteurs, on modifiera convenablement les sections et on recommencera les calculs de vérification.

La première partie du problème est ainsi résolue.

Mais un réseau ne se trouve pas toujours dans les conditions de pleine charge que nous avons supposées. A certaines heures de la journée, une partie seulement du réseau est utilisée, et il arrive que, pendant qu'un conducteur travaille à plein débit, le conducteur voisin n'est parcouru que par un courant très faible.

Il faut donc rechercher l'influence qu'exerce sur le réseau entier la fluctuation du courant dans ses différentes parties.

Le théorème sur lequel se sont basés MM. Herzog et Stark pour résoudre cette question est celui de la *superposition des courants*, qui peut s'énoncer ainsi :

Le courant engendré dans une partie du réseau, par l'intercalation simultanée dans celui-ci de plusieurs circuits d'utilisation, est égal à la somme des courants qui y seraient déterminés par l'adjonction successive de ces circuits.

Pour appliquer ce principe, considérons une dérivation d'une valeur convenable, de 10 ampères par exemple, et établissons-là successivement aux différents nœuds du réseau : pour chacune de ses positions, nous aurons, dans les différents conducteurs, une certaine répartition de courants et pour connaître les valeurs de ceux-ci, nous pouvons employer la méthode de sectionnement précédemment décrite.

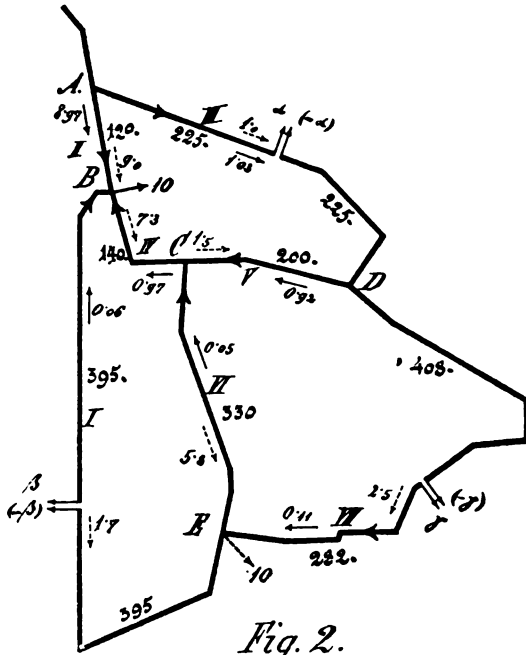
Nous obtiendrons ainsi autant de systèmes d'équations qu'il y a de nœuds et leur résolution nous permettra de déterminer le courant qui circule dans l'un quelconque des conducteurs, quand la dérivation occupe l'un quelconque des nœuds du réseau.

Alors on dressera un schéma composé d'autant de tableaux qu'il y a de conducteurs.

Dans chaque tableau, on représentera par une horizontale la résistance du conducteur correspondant et on portera sur deux perpendiculaires, élevées aux extrémités de cette droite, des longueurs proportionnelles aux intensités des courants que reçoivent les autres conducteurs quand la dérivation est supposée occuper successivement les deux extrémités du conducteur considéré.

On portera ces longueurs au dessus ou au dessous de l'horizontale suivant le sens du courant, qui sera considéré comme positif ou négatif selon qu'il concorde ou non avec l'orientation des flèches tracées au préalable arbitrairement sur chaque conducteur.

Reprenons notre exemple, fig. 2.



Etablissons le courant dérivé unitaire de 10 ampères
 premièrement en B, toutes les autres dérivations étant
 supprimées : ouvrons les mailles du réseau en des points
 α, β, γ choisis arbitrairement.

Les longueurs sont indiquées sur la figure, les sections sont les mêmes qu'auparavant. Nous pouvons écrire les trois équations :

$$1) 4,5\alpha = 1,7(10 + \beta) + 3,7(\gamma - \beta) + 7,7(-\gamma) + 12,2(-\alpha),$$

$$2) -4\alpha + 18(-\gamma) = 9(-\beta) + 23\gamma,$$

$$3) \quad 20\beta = 2(-\alpha - \gamma) + 11\gamma + 31(-\beta),$$

d'où l'on tire la valeur des inconnues

$$\alpha = 1,03$$

$$\beta = -0,06$$

$$\gamma = -0,11$$

On déduit de ces valeurs la répartition du courant indiquée par les flèches en traits pleins.

Transportant la dérivation unique de 10 ampères au point E et établissant les équations, on trouve, en les résolvant,

$$\begin{aligned}\alpha &= 1 \\ \beta &= 1,7 \\ \gamma &= -2,5\end{aligned}$$

et une distribution de courant dans le réseau indiquée par les flèches pointillées.

Avec ces données, et après avoir marqué sur les conducteurs des flèches dont le sens sera adopté comme positif, on peut déjà construire le tableau du conducteur B E.

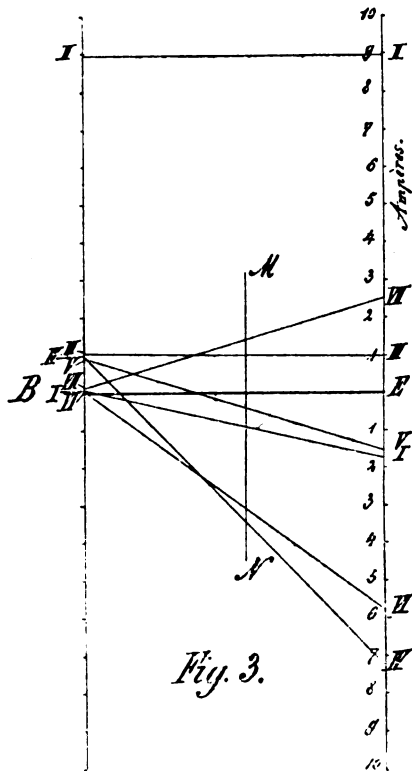


Fig. 3.

Dans la fig. 3, la droite BE représente la résistance de ce conducteur.

Sur la perpendiculaire élevée au point B , portons des longueurs $BI, BII, \dots BVII$ proportionnelles aux courants que nous avons reconnus dans les conducteurs marqués $I, II, \dots VII$ sur la fig. 2, quand la dérivation de 10 ampères était en B .

Sur la perpendiculaire de l'extrémité E , faisons la même chose pour la position E de la dérivation.

Joignons les points $I, I; II, II; \dots VII, VII$; ainsi obtenus par des droites. En faisant passer de proche en proche la dérivation unitaire de B en E le long du conducteur I (de la fig. 2), les courants qui parcourent les autres conducteurs sont déterminés à chaque instant par les longueurs comptées à partir de l'horizontale, que les lignes $I, I; II, II; \dots VII, VII$ découpent sur une verticale MN se mouvant proportionnellement le long de la ligne BE de la figure 3.

On peut de cette façon se rendre un compte exact des changements que tout nouveau circuit dérivé sur I introduit dans la répartition du courant dans le réseau.

On construit un tableau semblable pour chaque distributeur.

En résumé, la solution indiquée du premier problème donne à l'électricien le moyen de vérifier la convenance des sections choisies pour les différents conducteurs; la seconde méthode lui permet, dans la pratique, de tenir compte des modifications introduites dans le réseau pendant l'exécution des travaux, et de suivre, pendant l'exploitation, les fluctuations journalières et annuelles du courant dans les différentes parties du réseau.

M. Bayet. — Cette méthode me paraît assez compliquée; le vrai problème à résoudre serait de déterminer la section des conducteurs en se donnant le débit présumé et la perte de charge acceptée.

M. De Bast. — Je pense que ces calculs conviennent surtout pour la vérification d'une distribution projetée.

M. du Welz. — En général ces problèmes de distribution se posent avec beaucoup d'incertitude, en sorte qu'il est bien difficile d'obtenir à priori une solution rationnelle.

M. Eric Gerard. — Dans la rédaction d'un projet de réseau, il faut cependant fixer le débit total et sa répartition, sans quoi tout calcul serait impossible. En fait, on ne manque pas de données à cet égard; l'éclairage existant à remplacer, les engagements pris par de grands consommateurs de lumière, ceux à prévoir sont autant d'éléments qui guident l'ingénieur dans l'étude d'une distribution. On prévoit aussi les extensions ultérieures en majorant le débit dans une proportion convenable.

M. L'Hoest. — La méthode qui vient d'être exposée permet de se rendre compte immédiatement des modifications que le service d'un nouveau client apportera dans les conditions de distribution d'un réseau existant.

M. de Weydlich, Président. — En remerciant M. De Bast du soin qu'il a mis à nous exposer la communication de M. Centurione, nous passons au second objet à l'ordre du jour, qui est la conférence de notre camarade M. Bayet, sur les conditions d'installation des stations centrales d'électricité.

M. Bayet. — (*)

L'éclairage électrique n'a toujours été considéré jusqu'à présent, et ne l'est encore souvent, que comme éclairage de luxe. Il serait cependant opportun de se demander s'il lui est possible actuellement de lutter contre l'éclairage au gaz.

(*) Résumé de cette conférence rédigé par l'auteur.

Les dynamos à courants continus atteignent un rendement de 90 à 93 %, le rendement des dynamos à courants alternatifs, excitatrice comprise, est de 85 à 90 %, celui du transformateur est de 94 à 96 %, et enfin la machine à vapeur donne un rendement mécanique de 85, 90 et même 93 %. Il n'y a donc plus guère d'amélioration à espérer quant au rendement de ces organes ; le prix des appareils pourra seul devenir plus favorable. Les choses qui restent encore à améliorer sont donc les accumulateurs, la lampe à incandescence et les câbles pour haut potentiel.

Nous devons essayer, avec les moyens dont nous disposons actuellement, d'arriver à faire de l'éclairage électrique à un prix relativement peu élevé ; pour atteindre ce but, il nous faut des stations centrales bien comprises, coûtant bon marché, et ne laissant cependant rien à reprendre sous le rapport du rendement. De même, pour diminuer les frais d'exploitation, nous tâcherons de réduire le personnel autant que possible, sans que cela nuise en rien à la bonne marche de l'installation.

Il est à remarquer qu'on tient trop peu compte de la partie mécanique dans les installations d'électricité, alors, qu'au contraire, c'est la partie qui devrait être la plus soignée, puisque c'est d'elle en grande partie que dépend la bonne marche de la station.

Dans ce qui suit, j'étudierai donc les stations centrales au point de vue de leur prix d'installation, et la manière dont elles doivent être organisées pour répondre le mieux aux besoins de l'éclairage électrique.

Les stations d'électricité se trouvent pour la plupart au centre des villes, entourées de maisons habitées, quelquefois même installées dans des sous-sols. Il faut donc que les stations centrales tiennent peu de place, le terrain étant non seulement cher, mais encore rare au centre de la ville ; il est nécessaire encore que les

machines fassent peu de bruit pour éviter les réclamations des voisins.

Nous devons nous demander d'abord quelle est la chaudière et quelle est la machine à vapeur qu'il faut employer.

Chaudière. — Sauf dans les systèmes de distribution peu nombreux qui emploient des accumulateurs, il faut que la production de la station varie à chaque instant avec la dépense. Pendant la nuit et la plus grande partie de la journée, la production de l'usine étant très faible, l'extinction et le rallumage journalier d'une ou de plusieurs chaudières s'imposent.

La chaudière que nous emploierons aura une chambre d'eau fort petite, pour diminuer autant que possible les frais de rallumage, et hâter la remise en pression; de plus, elle sera étudiée pour subir aisément les dilatations et les retraits que l'extinction et la mise à feu journalières déterminent forcément.

La chaudière qui remplit le mieux ces conditions, c'est la chaudière multitubulaire, que nous trouvons d'ailleurs dans presque toutes les stations centrales. Elle ne tient pas beaucoup de place et ne coûte pas plus cher qu'une autre; sa chambre d'eau est petite; une telle chaudière est facile à réparer et surtout à monter, car elle se compose en grande partie de pièces de faible poids. Pour cette raison et aussi à cause de son faible poids total, c'est la seule que nous puissions employer, si nous mettons les chaudières à l'étage.

On en arrive maintenant à hausser de plus en plus la pression de la vapeur aux chaudières; on marche couramment aujourd'hui à 12 atmosphères, et on parle même d'atteindre 15 atmosphères. Dans ces conditions qui donnent pour la machine à vapeur, la marche la plus économique, puisqu'on emploie la triple expansion, il n'y a plus qu'une seule chaudière possible, c'est la chaudière multitubulaire.

Aussi, dans la marine marchande où les questions de sécurité, d'espace, de prix d'achat, et d'économie en charbon, ont une importance considérable, on emploie généralement le type multitubulaire.

Pour diminuer le capital engagé, nous calculerons notre usine pour donner exactement ce qu'il faut de vapeur, et pendant les deux ou trois heures de grande décharge, nous ferons produire aux chaudières une quantité de vapeur considérable, en établissant le tirage forcé.

Nous pouvons obtenir ce tirage de trois manières :

- 1° En soufflant en-dessous des grilles de la chaudière;
- 2° En envoyant un jet d'air dans la cheminée;
- 3° En ayant un ventilateur aspirant dans la cheminée.

Le premier de ces systèmes est le meilleur; des expériences faites en France, on déduit que pour avoir par mètre carré de grille un tirage de 15 m/m il faut dépenser 1 cheval; pour un tirage de 20 m/m , 1,5 cheval; pour un tirage de 25 m/m , 2,2 chevaux; pour un tirage de 30 m/m , 3 chevaux.

La quantité de charbon par mètre carré de surface de grille qu'on peut brûler avec un tirage de 15, 20, 25, 30 m/m , est respectivement de 137, 149, 166, 182 kilogrammes.

La chaudière multitubulaire est très élastique et peut occuper un très petit volume, comme c'est le cas pour la chaudière Belleville par exemple. D'autres systèmes, comme ceux de Babcock et Wilcox, de Naeyer, etc., occupent un espace plus considérable. Pour ces dernières, l'espace occupé en plan, par kilogramme de vapeur que la chaudière est susceptible de fournir, est de 60 centimètres carrés. Le prix moyen de bonnes chaudières multitubulaires est de 7 francs par kilogramme de vapeur.

La chambre d'eau et la chambre de vapeur, étant toutes deux fort petites dans le système qui nous

occupe, il est bon d'avoir une alimentation absolument automatique des chaudières, pour éviter les variations de pression.

Le niveau de l'eau est maintenu constant dans la chaudière au moyen d'un flotteur qui ouvre et ferme la vanne d'alimentation. Le petit cheval desservant les chaudières sera pourvu d'un accumulateur qui le mettra automatiquement en marche. De cette manière, nous n'aurons pas à nous occuper de l'alimentation des chaudières.

Le seul accident à éviter, c'est l'entraînement de l'eau avec la vapeur. Aussi, prendra-t-on la précaution d'établir des purgeurs automatiques sur les collecteurs de vapeur, ainsi que sur le tuyau d'amenée à chaque machine.

Machine à vapeur. — La machine à vapeur utilisée pour l'éclairage électrique doit être économique, c'est-à-dire dépenser peu de vapeur par cheval utile, coûter bon marché, occuper peu de place, faire peu de bruit, et demander peu ou pas de surveillance.

Le prix d'une machine est plus ou moins fonction du poids; pour réduire le prix, il faut employer la machine marchant à grande vitesse et à haute pression; en vue de diminuer l'espace occupé par cheval, nous donnerons la préférence au type vertical. Pour avoir une machine économique, nous emploierons le compoundage et la triple expansion avec ou sans condensation suivant le cas.

Si les électriciens sont d'accord sur la chaudière à employer, il n'en est plus de même pour la machine à vapeur.

Sur le continent, on emploie de préférence la machine à marche lente, faisant de 60 à 120 tours à la minute, tandis qu'en Angleterre et en Amérique, on fait presque toujours usage de la machine à grande vitesse faisant de 250 à 400 tours à la minute.

La machine à marche lente coûtera plus cher qu'une machine à marche rapide, l'espace occupé par cheval indiqué sera plus grand à moins qu'on emploie une machine de grande puissance, ce qui n'est possible que dans de très grandes stations centrales. Ces machines ont, en outre, le défaut de demander beaucoup de surveillance. En revanche, elles dépensent un peu moins de vapeur par cheval indiqué ; leur rendement mécanique est de 80 à 85 %.

Au sujet de la consommation de charbon, il importe de remarquer qu'il est peu probable que sur le continent, les moteurs électriques prennent beaucoup d'extension, étant donné le prix élevé du cheval utile produit par l'électricité, comparativement avec ce qu'on peut obtenir par d'autres moyens, le gaz et le pétrole par exemple ; la marche de la station ne sera jamais alors que de 3 à 4 heures, et dans ce cas, la consommation de vapeur par cheval n'a pas l'importance qu'on veut lui donner.

La vraie machine à vapeur pour l'éclairage électrique, c'est donc la machine à grande vitesse.

Pour faire une machine à vapeur rapide, il faut adopter le type vertical, le simple effet, et la compression complète à fond de course.

Ces conditions ont pour but d'augmenter la durée de la machine, d'éviter les accidents et surtout le bruit. En adoptant le simple effet, la bielle appuyera toujours du même côté ; la compression complète à fond de course a pour but de faire adhérer la tête de bielle à l'arbre, et de ramener graduellement la pression exercée sur la tête de bielle, à la valeur qu'elle a au moment de l'admission.

De cette manière, on évite les coups de bélier qui se produiraient à chaque admission.

Le graissage des machines à grande vitesse doit naturellement être parfait pour éviter les échauffements.

Pour cela, on enferme tout le mécanisme dans une sorte de caisse fermée, et on fait plonger les parties qui travaillent dans un bain d'eau et d'huile. L'eau mélangée d'huile projetée par la bielle en mouvement suffit à amener un graissage parfait des glissières, des coussinets de palier, des pivots de crosse, etc. Ainsi, nous ne perdrons pas une seule goutte d'huile, car au bout d'un certain temps nous reprendrons le mélange d'eau et d'huile, nous le filtrerons et recueillerons presque toute l'huile que nous aurons mise.

Il n'y a plus d'échauffement à craindre; donc plus de surveillance.

Le mécanisme étant complètement renfermé, la machine est toujours propre, donc plus de nettoyage.

Il ne nous reste plus qu'un seul graisseur, celui qui imbibe d'huile la vapeur se rendant dans les cylindres; on peut parfaitement s'arranger de manière à le remplir au bout de 12 heures de marche; et le remplissage de ce graisseur peut se faire en marche.

Le simple effet à un défaut, c'est de donner une grande surface de refroidissement par cylindre; pour une machine à triple expansion, nous en aurons donc trois. Dans la machine Willans, on tourne la difficulté en mettant les cylindres en tandem, l'un au dessus de l'autre; la distribution de vapeur se fait par la tige creuse du piston. Ce système résoud d'une façon originale et très mécanique le problème de la marche à grande vitesse et à triple expansion.

On arrive ainsi avec des machines à grande vitesse, de la force moyenne de 20 à 50 chevaux, à dépenser :

Pour la machine compoud sans condensation, 10.35 kil. de vapeur par cheval indiqué ;

Pour la machine compoud avec condensation, 8.7 kil.

Pour la machine à triple expansion sans condensation, 8.5 kil.

Pour la machine à triple expansion avec condensation, 6.8 kil.

On le voit donc, les machines à grande vitesse n'ont pas une consommation de vapeur plus grande que les machines à faible vitesse.

La machine à vapeur rapide destinée à l'éclairage électrique supprime le régulateur à boules, et le remplace par un régulateur mis dans le volant de la machine ; le réglage ainsi obtenu est parfait et en pleine charge ou à vide la machine tourne avec la même vitesse.

L'électricien n'aura donc jamais à s'occuper de la machine à vapeur ; sa mission se bornera à régler son voltage par les résistances qu'il introduira ou retranchera dans le champ magnétique des dynamos.

Avec la machine à grande vitesse, nous avons donc suppression du mécanicien, du nettoyeur, des dépenses en chiffons, réduction au minimum des dépenses de graissage.

De plus, la machine occupe peu de place, ne fait pas de bruit et permet le couplage direct avec la dynamo ; c'est donc bien là, la machine que nous devons employer.

Les chaudières multitubulaires donnent, nous l'avons dit, un entraînement d'eau assez grand. Pour éviter les coups d'eau dans le cylindre, nous ferons arriver la vapeur à la machine par le bas, dans un appareil appelé séparateur, appareil qui a pour but de dépouiller la vapeur de la plus grande partie de l'eau entraînée.

Le prix d'achat par cheval utile sera naturellement plus grand pour une machine à triple expansion, que pour une machine ordinaire à un cylindre.

Ainsi, pour les machines ordinaires, le prix par cheval utile est de 100 francs ; pour les machines compound, il n'est guère supérieur ; pour les machines à triple expansion, il est de 113 francs.

Il ne faut pas oublier que le prix d'installation du

cheval vapeur comprend le prix de la machine, ainsi que celui de la chaudière qui y est accouplée; donc, si la machine à triple expansion coûte plus cher qu'une machine à vapeur ordinaire, dépensant moins de vapeur, la chaudière de la première coûtera moins cher. Il se peut donc qu'il y ait compensation ou même diminution.

Ainsi, pour la machine à vapeur ordinaire, dépensant 15 kil. de vapeur au cheval, on a :

Prix de la machine par cheval utile . . .	fr.	100
Prix de la chaudière par cheval utile . . .	»	105
Prix d'installation par cheval	»	205
Espace occupé par cheval utile :		
Pour machine.	mq	0,0950
Pour la chaudière.	»	0,0900
Total.	»	0,1850

Pour la machine à vapeur compound, dépensant 11 kil. de vapeur :

Prix de la machine par cheval	fr.	100 00
Prix de la chaudière par cheval	»	80 50
Prix d'installation par cheval	»	180 50
Espace occupé par cheval :		
Par la machine, de 120 à 300 c. ² .		
Par la chaudière, 690 c. ²		
Total, mq 0,0810 à 0,0990.		

Pour la machine à triple expansion dépensant 9 kil. de vapeur :

Prix de la machine	fr.	113
Prix de la chaudière	»	63
Prix d'installation	fr.	179
Espace occupé par cheval :		
Par la machine, 110 à 300 cent. ² .		
Par la chaudière, 540 cent. ² .		
Espace total occupé par cheval, de mq 0,0650 à 0,0840.		

Pour les moteurs compound à triple expansion avec condensation, il y aurait encore une légère diminution de prix.

Le bruit causé par les machines à grande vitesse et qui s'entend à l'intérieur du bâtiment, provient de l'échappement.

Il y a deux moyens d'éviter ce bruit : marcher à condensation, ou étouffer le bruit d'une manière quelconque.

Avec les machines à grande vitesse, nous aurons dans la station un condensateur à chaque machine et une pompe à air pour un groupe de machines. L'eau d'alimentation des chaudières sera prise naturellement dans les eaux de condensation. Dans les installations au centre des villes, où l'eau coûte cher, on a proposé un système de condenseur où la même eau, après avoir été échauffée dans le condenseur, est ensuite refroidie d'une vingtaine de degrés, et peut servir à nouveau.

Les eaux de décharge des condenseurs sont prises par une pompe, qui les montent jusqu'au bassin supérieur d'une colonne de 10 mètres de haut, où l'eau tombe en cascade sur une série de claies ou de gradins disposés de façon à diviser l'eau et à retarder sa chute ; en sens inverse du mouvement de l'eau, on établit un courant d'air froid envoyé par un ventilateur.

L'économie qui résulte d'un pareil procédé est encore à démontrer ; et si la station est d'une certaine importance, on en arriverait à des installations énormes pour regagner, en somme, très peu de chose.

Si on ne peut pas employer la marche avec condensation, on en verra l'échappement des machines dans une grande cheminée en tôle, où l'eau froide destinée à l'alimentation viendra s'échauffer en condensant une grande partie de la vapeur, avec laquelle elle sera intimement mélangée. Par ce moyen l'eau d'alimentation peut être portée à une température de 50 à 80°.

Nous savons ce qu'une machine dépense de vapeur par cheval; il s'agit de voir combien de kilogrammes de charbon nous dépenserons par cheval. Sous ce rapport, il y a une grande différence dans la consommation entre la marche d'essai et la marche courante.

Aux essais on emploie du charbon de toute première qualité, ou même mieux des briquettes spécialement fabriquées pour les essais, et on a des chauffeurs expérimentés qui ont l'habitude des essais. On arrive ainsi à vaporiser 9, 10 et même 11 kilogrammes d'eau par kilogramme de charbon pur (cendres déduites). De cette manière on arrive, dans les essais, à consommer 750 à 800 grammes de charbon pur (cendres déduites) avec des machines Compound à condensation, et de 650 à 700 avec des machines à triple expansion et condensation. La garantie de consommation de charbon, ne signifie donc rien du tout; la vraie garantie c'est le nombre de kilogrammes de vapeur par cheval indiqué aux cylindres.

Dans la pratique, on ne doit jamais compter que sur une vaporisation de 6, 5 à 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de charbon brut, et en sus, compter sur 30 % pour les dépenses occasionnées par les extinctions et mises à feu journalières des chaudières.

Dynamos. — Nous nous occuperons d'abord de la dynamo à courants continus.

Avec des machines tournant à 250 tours, nous pourrons faire le couplage direct de la dynamo avec la machine, ou prendre, une dynamo à 1200 tours et l'actionner par courroies. La dynamo à 1200 tours coûtera naturellement meilleur marché que la dynamo à 250 tours; mais l'espace occupé est bien plus considérable car il nous faut au moins, pour avoir un bon fonctionnement de la courroie, une distance de 4^m50 entre l'axe de la machine, et l'axe de la dynamo. On tourne la difficulté en mettant la dynamo à l'étage, au dessus des machines; mais outre le ballotement des courroies, on a le désagrément de faire vibrer d'une manière assourdissante tout le bâtiment.

Il vaut donc infiniment mieux faire le couplage direct de la dynamo et du moteur, mais pour les dynamos à courants continus, on est forcé d'en arriver aux machines à anneaux plats, comme le type Desrozières, ou celui du genre Siemens, avec l'armature extérieure; tous deux laissent des doutes dans l'esprit, comme durée, et, comme rendement.

Le prix des dynamos à courants continus est de 150 francs au kilowatt, pour les dynamos de moyenne force.

Dynamos à courants alternatifs. — Les conditions qui permettent le couplage en quantité des alternateurs ne sont pas encore connues; ce sont les tâtonnements des praticiens qui ont permis d'obtenir ce résultat tout récemment.

Comme quelques uns seulement y sont arrivés, nous payerons actuellement la dynamo à courants alternatifs plus cher qu'elle ne vaut. Ici la plus grande partie des types sont à anneau plat ou à disque; nous y trouverons donc facilement des dynamos tournant à faible vitesse. Nous donnerons la préférence aux systèmes dans lesquels la bobine est fixe, et le champ magnétique tournant; la réparation des induits est alors chose aisée et le remplacement d'une section de la bobine se fait en peu de temps.

Ce que nous devons surtout éviter avec la dynamo à courants alternatifs, dont le voltage est d'ordinaire de 2000 volts, c'est d'avoir une terre à la bobine. La terre à la bobine provient surtout de l'huile qui graisse les paliers; nous devons donc prendre bien soin que l'huile ne puisse atteindre la bobine. Le mieux c'est de faire le graissage des paliers à la graisse minérale, les graisseurs étant de capacité suffisante pour une marche de 6 ou de 12 heures, et fonctionnant seuls.

Le prix des dynamos à courants alternatifs, excitatrice comprise, est de 160 à 200 francs au kilowatt.

L'espace occupé par une dynamo d'une force donnée varie beaucoup avec les systèmes ; il ne sera jamais plus grand que l'espace occupé par la machine à vapeur de même force. Pour les dynamos à disque, on peut être certain de n'avoir jamais plus de 100 centimètres carrés par cheval.

Coût d'une station centrale. — Sachant maintenant ce que coûte l'installation d'un cheval vapeur et connaissant le prix des dynamos, nous pouvons nous demander ce que coûtera une station par cheval vapeur indiqué, sans faire entrer dans ce prix la canalisation électrique.

Quand la station se trouve au centre de la ville, nous avons tout intérêt à établir les bâtiments en élévation, et à employer le type de la station Siemens à Berlin. Nous avons vu que pour les machines Compound à triple expansion, l'espace occupé par la chaudière est plus grand que celui occupé par la machine. Si donc on dispose la station en étages, on voit qu'avec des machines à triple expansion l'espace strictement nécessaire serait de $0^m^2,054$; en se donnant 2 à 3 fois cet espace, on aura largement de quoi disposer le tout à l'aise ; dans ces conditions on peut arriver à n'occuper qu'un espace de $0^m^2,108$ à $0^m^2,162$ par cheval.

A Brooklyn, en n'employant que des machines ordinaires sans condensation, on n'a pas dépassé $0^m^2,195$ par cheval. Si nous mettons chaudières et machines au même niveau, l'espace occupé sera naturellement plus grand ; on peut compter dans ce cas sur $0^m^2,20$, à $0^m^2,25$, par cheval.

A Brooklyn encore, la station de la compagnie Edison a coûté 800 francs par cheval et, à Berlin, l'usine Siemens a nécessité 625 francs par cheval.

D'après les chiffres que j'ai donnés plus haut, on a vu que par cheval, la chaudière et la machine coûtent 180 francs ; si on admet une dynamo à courant continu ayant un rendement de 90 %, le prix d'installation par cheval utile développé par les machines sera de 280 francs.

Pour des dynamos à courants alternatifs ayant un rendement de 85 % et coûtant 20 centimes par watt, le prix d'installation au cheval s'élèvera à 305 francs. On peut donc, dans un avant-projet d'éclairage, si l'on se trouve dans des conditions ordinaires (c'est-à-dire dans un pays où les matériaux et la main d'œuvre coûtent bon marché) on peut, dis-je, compter qu'on ne dépassera pas le chiffre de 600 francs par cheval.

Canalisation électrique. — Connaissant le prix de la station, nous devons chercher le prix de la canalisation électrique.

Dans les systèmes à 2 ou 3 fils, on emploie des câbles de cuivre posés sur isolateurs dans un caniveau en béton. Dans ce cas, il est préférable de ne pas employer des câbles, mais des plaques de cuivre : l'oxydation se fera à la surface et n'ira pas plus loin, tandis qu'avec des câbles de cuivre nus, l'oxydation finira par atteindre de proche en proche tous les fils dont se composent les câbles. Dans ces systèmes la pose est fort coûteuse car elle demande beaucoup d'hommes et beaucoup de temps.

Quant on emploie le système à 5 fils avec les courants alternatifs, il faut des câbles isolés. Les uns prennent des câbles sous plomb où l'isolement est obtenu avec du caoutchouc, les autres des câbles également sous plomb où l'isolement se fait par du coton ou du jute goudronné.

Quel que soit le système de câbles isolés que l'on emploie, une question se pose : faut-il tirer les câbles ou est-il préférable de les poser.

En Amérique, on emploie presque toujours le premier de ces systèmes, dans le but de pouvoir remplacer facilement un câble détérioré sans qu'il soit besoin de faire des fouilles et d'ouvrir une tranchée. On en arrive à ces canalisations très coûteuses, qui sont décrites dans le tome II, du *Cours d'électricité* de M. E. Gerard, pages 83 à 89. Il est bon de faire la remarque que le tirage des câbles les détériorent toujours.

Sur le continent, on préfère poser les câbles et les

enfouir dans la terre ; c'est plus hardi, mais le système semble parfaitement réussir.

Si on adopte le câble sous plomb avec isolement au caoutchouc, et ayant 600 mégohms d'isolement par kilomètre, on trouve les prix suivants pris par rapport au kilogramme de cuivre de l'âme :

Câble de	1.13	m ² /m ²	.	.	.	fr.	88	70
»	5.58	»	.	.	.	»	34	30
»	10.90	»	.	.	.	»	25	00
»	30.00	»	.	.	.	»	16	40
»	80.00	»	.	.	.	»	13	85

Ainsi le cuivre coûte 2 francs le kilogramme et l'isolement, même pour câbles de 80 m²/m² de section, coûte plus de dix francs. Dans le système de distribution par courants alternatifs, comportant un transformateur par maison, les câbles de distribution sont toujours de faibles section, et nous payons l'isolement encore plus cher. Avec les câbles isolés en caoutchouc, d'assez forte section, la densité maximum de courant à admettre n'est que de 2 ampères par millimètre carré.

Le coton est un excellent isolant à condition d'être parfaitement sec ; c'est en partant de ce principe que la maison Berthoud et Borel, et celle de Siemens, ont essayé de diminuer le prix des câbles en faisant l'une l'isolement au coton, l'autre l'isolement avec du jute. Les câbles ainsi isolés sont ensuite recouverts d'une ou de deux couches de plomb séparées par du brai de gaz, couches qui ont simplement pour but d'empêcher l'humidité de pénétrer. Les câbles fabriqués par ce procédé possèdent un excellent isolement, et la densité de courant peut être portée à 3 ou 4 ampères par millimètre carré.

Voici des prix des câbles Berthoud et Borel :

Câble de	1.20	m ² /m ²	de section,	fr.	20	30	par kg. de cuivre.
»	2.69	»	»	16	00	»	»
»	15.00	»	»	7	95	»	»
»	30.50	»	»	6	75	»	»
»	40.00	»	»	6	60	»	»
»	63.60	»	»	6	15	»	»

Pour les courants alternatifs, on emploie maintenant les câbles concentriques, et le conducteur extérieur étant mis à terre pour éviter les accidents qui pourraient arriver en touchant le câble, n'a plus besoin d'isolement. Je n'ai pu me procurer les prix des câbles concentriques, mais il est évident qu'ils seront beaucoup plus faibles que ceux de deux câbles isolés de même section. Il est à recommander, quand on fait les essais de câbles pour haut potentiel, de ne pas y procéder à un potentiel plus élevé que celui du régime normal ; cela diminuera de beaucoup le prix du câble, et celui-ci n'en sera pas plus mauvais pour cela.

Un principe qu'on ne doit jamais oublier, quand on fait une canalisation pour haut potentiel, c'est qu'il ne doit pas y avoir une seule épissure faite dans la partie de la canalisation mise en terre.

L'isolement d'une canalisation à courants alternatifs, même quand on marche à 2000 volts, sera toujours bien supérieur à l'isolement de tout autre système.

En effet, le transformateur possède une résistance à l'isolement très élevée, et les terres de l'installation qu'on alimente n'influent que sur le circuit secondaire. Dans tous les autres systèmes, au contraire, chaque installation nouvelle diminue l'isolement de l'ensemble, et pour pouvoir marcher à 400 ou 500 volts, on est obligé d'avoir un isolement très fort dans les installations particulières, en sorte que le prix d'installation par lampe est presque doublé.

Le système de distribution par courants alternatifs, ayant un transformateur par maison, est le seul vraiment pratique pour l'éclairage électrique ; la canalisation coûte meilleur marché, est meilleure, la distribution peut se faire à n'importe quelle distance, et l'installation des lampes chez les abonnés coûtera aussi bon marché.

Rendement d'une station centrale. — Une dernière question nous reste à traiter : le rendement d'une station centrale.

A Berlin, on admet que jamais plus de 70 % des lampes ne seront en service au même instant, et que l'éclairage moyen est de 700 heures par lampe et par année.

En Angleterre, on compte sur un service d'éclairage de 3 à 3.5 heures par lampe et par jour. Dans ces conditions le rendement de la station sera pour

700 heures d'éclairage	R = 11.60
1080 "	R = 17.83
1260 "	R = 20.80

Depuis que l'éclairage électrique et le moteur électrique existent, on a poursuivi avec énergie l'idée d'augmenter le rendement des stations par l'adjonction de la distribution de la force à domicile, et on ne voit toujours rien venir.

Du reste, à Paris, où le kilowatt vaut fr. 1-20, un moteur électrique à 90 % de rendement fournirait dans ces conditions le cheval à fr. 0-98.

Autre part, le prix du kilowatt est souvent de fr. 0-80 et le prix du cheval serait de fr. 0-66 ; enfin, en admettant qu'on vende le kilowatt à fr. 0-40, le prix du cheval serait encore de fr. 0-33.

Le moteur à gaz, ne dépensant qu'un mètre cube par cheval heure, le prix du cheval sera donc de 10 à 20 centimes. Les dépenses d'huile et d'amortissement sont les mêmes pour le moteur à gaz et pour le moteur électrique. Même où le gaz est à 10 centimes, donc quand le cheval utile rendu à domicile est à un prix relativement bas, on constate qu'il y a fort peu d'abonnés.

Admettons que nous puissions placer des moteurs ; nous ne pourrions en prendre qu'une faible proportion de la force de la station, afin qu'en hiver quand l'éclairage et la force motrice viendraient à se rencontrer l'usine puisse suffire à la dépense, sans qu'il soit besoin d'augmenter le capital.

Admettons que nous prenions 25 % de la force de la station pour le service de la force motrice, et que ce

service fonctionne 12 heures par jour, deux chiffres évidemment forcés, le rendement de l'usine, où la durée d'éclairage annuel est de

700 heures,	deviendrait	R = 29.40 ;
pour 1080	« il serait	R = 35,70 ; et
pour 1260	« il atteindrait	R = 38.80.

Il faut aussi remarquer que le quartier que nous éclairerions, le seul même que nous puissions éclairer, c'est le centre de la ville ; c'est-à-dire celui où nous ne pourrions guère avoir l'espoir de placer de la force motrice, celle-ci ne coûterait-elle que le prix du cheval auquel les moteurs à vapeur la fournissent.

Dans un port de mer, on peut, paraît-il, fournir de la force motrice, quel qu'en soit le prix, et le rendement atteint, dit-on, 35 à 40 % ; ces chiffres ne peuvent cependant être tenus comme sérieux, étant donnés par les sociétés exploitantes.

Quand on fait un projet d'éclairage, on ne doit donc jamais compter sur le moteur électrique pour espérer des bénéfices, qui certainement ne se réaliseraient pas ; une marche de 700 à 1000 heures est ce qu'on obtiendra en règle générale.

M. de Weydlich, Président. — Nous devons des remerciements à notre camarade M. Bayet pour son intéressante communication qui abonde en renseignements précieux pour le praticien.

M. L'Hoest, Secrétaire-Général. — M. Bayet rendrait service à beaucoup d'entre nous en rédigeant la communication que nous avons entendue et dont nous ne pourrions donner, d'après des notes que nous avons prises, qu'une analyse bien incomplète.

M. Eric Gerard. — Je me rallie au vœu qui vient d'être formulé. M. Bayet a exposé un grand nombre de faits

dont beaucoup d'ingénieurs, absents à la séance, pourront tirer profit.

M. Bayet. — Me rendant à votre désir et pour permettre la discussion sur ma communication, j'en remettrai un résumé au Secrétariat général.

M. de Weydlich, *Président*. — Nous ajournons donc à la prochaine séance cette discussion, ainsi que la communication de M. Mélotte que l'heure avancée ne permettrait pas de terminer aujourd'hui.

La séance est levée à une heure.

SÉANCE DU 25 JANVIER 1891

Présidence de M. de Weydlich, président.

Ont signé la liste de présence MM. Bayet, Broad, Chantraine, Close, Collard, Dawson, De Bast, Demany, Demarteau, Discry, Eric Gerard, Grottendieck, Hilgers, Larmoyer, L'Hoest, Libert, Mélotte, Orban, Roosen, du Welz et de Weydlich.

M. de Weydlich, président.—Tous les membres effectifs ont reçu la circulaire du Comité, contenant le libellé et l'exposé des motifs des modifications qu'il vous propose d'apporter aux articles 9, 12 et 13 des statuts. Ces propositions ont été appuyées par vingt membres effectifs, selon le vœu du règlement. Je les sou mets à la discussion de l'assemblée.

M. L'Hoest, secrétaire général. — On me signale une expression impropre qui s'est glissée dans la rédaction de l'article 9 nouveau. Il y est dit : *Le siège de la Société est à Liège. Il y sera tenu une assemblée générale chaque année, le dernier dimanche d'octobre.* Il faut évidemment : *Il y sera tenu obligatoirement une assemblée,* car nos statuts qualifient d'assemblées générales toutes les réunions autres que celles du Comité.

Un débat s'engage entre MM. Chantraine, Demany, L'Hoest, Libert, du Welz et de Weydlich sur le principe et sur la rédaction de l'article 12 proposé par le Comité.

M. de Weydlich, président.—Tous les membres effectifs ayant été convoqués régulièrement par lettre recommandée, je mets aux voix la nouvelle rédaction de l'article 12 ainsi modifié :

La cotisation annuelle des membres effectifs ou associés est fixée à vingt francs ; celle des membres temporaires à

dix francs. Le Comité, tenant compte de la situation financière de l'Association, est autorisé à réduire la première de ces cotisations à un taux intermédiaire entre quinze et vingt francs.

Les cotisations sont payables dans le premier trimestre de l'année sociale qui commence le 31 octobre.

Nous procéderons en même temps au vote des modifications aux articles 9 et 13 dont le libellé nouveau est ainsi proposé :

Art. 9. — *Le siège de la Société est à Liège. Il y sera tenu obligatoirement une assemblée, chaque année, le dernier dimanche d'octobre.*

Art. 13. — *Les statuts ne pourront être modifiés qu'après que tous les membres effectifs auront été convoqués par lettre recommandée ; cette lettre indiquera les propositions de modifications des statuts. Ces propositions, pour être soumises au vote de l'assemblée, doivent être appuyées par vingt membres effectifs.*

Toute modification, pour être adoptée, devra réunir au moins les trois quarts des suffrages des membres effectifs prenant part au vote.

Les membres effectifs peuvent voter par correspondance.

MM. Arendt, Astfalck, Bassot, Bayet, Bède, Bertemati, Broad, Bourquin, Chantraine, Close, De Bast, Demany, Demaret, Dierman, de Ecoreca, Frenay, Gerard Emile, Grottendieck, Haesen, Larmoyer, L'Hoest, Libert, Ludergrani, Mélotte, Minsier, Orban, Pescetto, Piérard, Quinaux, Ransy, Roosen, Turconi, van Vloten, du Welz et de Weydlich prennent part au vote soit directement, soit par correspondance.

La modification à l'article 12 est adoptée par trente-trois voix contre une et une abstention. (1)

La nouvelle rédaction des articles 9 et 13 est adoptée à l'unanimité.

(1) Après la séance, nous sont parvenus les votes, tous approuvés, de MM. Bertolini, Cammeo, Morelli, Nowinski et Winslow.

M. de Weydlich, président. — Les procès-verbaux des séances du 30 novembre et du 14 décembre publiés dans le dernier fascicule du bulletin, sont soumis à l'approbation de l'assemblée. — Adoptés.

Le secrétaire général dépose les publications parvenues à l'Association et communique une lettre de Sir William Thomson par laquelle cet illustre savant nous fait l'honneur d'accepter le titre de membre honoraire qui lui a été conféré.

La parole est ensuite donnée à notre camarade **M. Mélotte**, pour sa communication intitulée :

Note sur le calcul des dynamos.

Je me propose de développer ici une méthode de calcul des machines dynamos électriques. Je me hâte de dire que cette méthode n'a rien de bien nouveau ; j'ai seulement cherché à établir la voie qui me paraissait la plus simple pour arriver sûrement au résultat, en partant de conditions imposées.

Je n'ai pas à m'occuper du choix du type de machine : on a beaucoup dit et écrit sur ce sujet, et je me bornerai à rappeler le mémoire remarquable de M. Esson : « Some points in dynamos and motors design » lu devant l'Institution des Ingénieurs Electriciens anglais, et la discussion intéressante à laquelle il a donné lieu. J'ai donc supposé que ce type était fixé par des raisons théoriques, économiques ou autres.

Il ne faut pas se dissimuler que l'élaboration d'un projet de dynamo présente des difficultés sérieuses. Il est certain que le constructeur doit s'appliquer à produire une dynamo économique ; mais qu'entendrons-nous par économie : bon marché ou bon rendement ? Deux qualités excellentes individuellement, mais qu'il est difficile de réunir dans une même machine.

Il est aisé de construire des dynamos à rendement très élevé, en y mettant beaucoup de fer et beaucoup de cuivre, mais cela coûte cher. Par contre on pourra obtenir des machines à bas prix, mais d'un effet utile assez mauvais, en réduisant les poids et les sections des matériaux.

Si d'un côté les machines à grand rendement consomment peu, d'autre part leur amortissement coûte cher.

Une machine à bon marché demandera peu d'amortissement, mais beaucoup de charbon.

Le programme du constructeur est donc tout tracé : il doit tâcher de concilier autant que possible les deux conditions d'économie.

Lorsque l'on veut calculer une dynamo d'une puissance déterminée, on commence généralement par s'imposer certaines données, telles que le rendement, le nombre de tours et le voltage ou le débit en ampères. De ces données on pourra déduire successivement toutes les dimensions de la machine, en faisant intervenir en temps et lieu certains coefficients et résultats d'expérience ; on n'arrivera peut-être pas du premier coup à la perfection, mais après quelques essais, on obtiendra un résultat satisfaisant.

Le nombre de tours nous donne le diamètre de l'armature, si nous nous sommes fixé au préalable une vitesse périphérique. Cette vitesse doit être prise aussi grande que possible, car on sait que la puissance utile croît avec la vitesse, mais on doit rester dans des limites telles que la force centrifuge ne compromette pas la solidité.

On prend en général 12 à 17 mètres par seconde dans les induits à tambour ou à anneau. Pour les anneaux plats et les disques, on peut monter jusqu'à 25 mètres par seconde, mais dans les armatures ordinaires, le chiffre de 15 mètres est une bonne limite.

Soit D le diamètre de l'induit; s'il y a N tours par minute, $\frac{\pi D N}{60}$ est la vitesse périphérique. On a donc

$$\frac{\pi D N}{60} = 15^m, \quad \text{ou} \quad D = \frac{15 \times 60}{\pi N} \quad (1)$$

Il s'agit maintenant de savoir quel fil, et combien de spires il y aura sur l'armature ; ceci est une question d'appréciation dont la solution comporte assez bien de tâtonnements. Il existe pourtant certains principes qui doivent guider dans le choix de ces données.

Moins il y a de spires sur l'induit, moindre en est la réaction. La perte par effet Joule est aussi moindre, et l'on peut employer du cuivre de section relativement plus faible.

En revanche, la diminution du nombre de spires entraîne l'augmentation du flux et, par suite, de toutes les sections du circuit magnétique ; on augmente ainsi le poids de la fonte, du fer et du cuivre de l'excitation.

Il est bon d'adopter une densité de courant d'environ quatre ampères par millimètre carré. Mais cette règle n'a rien de rigoureux et admet de grandes variations.

En tous cas le fil doit se loger sur l'armature de manière à utiliser le mieux possible l'espace disponible. C'est ainsi que l'on est conduit à faire usage de barres rectangulaires ou de fils méplats isolés.

Dans le premier avant-projet, on prendra pour plus de simplicité un fil rond, de section correspondant à 4 ampères par millimètre carré.

Si D est le diamètre extérieur du fer de l'armature, d celui du fil isolé, $D + d$ sera le diamètre de la circonférence passant par les centres des fils rangés sur l'armature, et la longueur de cette circonférence, ou $\pi (D + d)$, divisée par le diamètre du fil isolé, donnera

$$\frac{\pi (D + d)}{d} = n$$

nombre de fils qu'on peut juxtaposer sur l'armature.

Dans les machines de faible puissance, on peut enrouler plusieurs couches superposées, surtout quand le voltage est élevé. Au contraire, dans les fortes machines, on ne met généralement qu'une couche de spires.

Le fil induit et le nombre de spires étant fixés, on procède au calcul du champ magnétique.

Un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique engendre une force électro-motrice $E = \frac{d\mathfrak{X}}{dt}$

Si Φ est le flux magnétique qui s'échappe d'un pôle, une spire qui fait une révolution complète subit une variation de 2Φ . En effet le flux est $\frac{\Phi}{2}$ dans chaque moitié de l'anneau, il passe donc de $\frac{\Phi}{2}$ à $-\frac{\Phi}{2}$ pour revenir à $\frac{\Phi}{2}$, soit 2Φ de variation.

Si la machine fait N tours par minute ou $\frac{N}{60}$ par seconde, la durée d'une révolution est $\frac{60}{N}$ de sorte que la *f. e. m.* moyenne est

$$E = \frac{d\mathfrak{X}}{dt} = \frac{2\Phi}{\frac{60}{N}} = \frac{2N\Phi}{60}$$

et comme il y a n_a spires en série entre deux balais, la *f. e. m.* totale est, en supposant le champ uniforme,

$$E = \frac{2Nn_a\Phi}{60}$$

Cette expression se rapporte au cas de deux pôles, c'est-à-dire que pour deux pôles, la variation est 2Φ ; pour P pôles elle sera $P\Phi$, et l'expression plus générale est

$$E = \frac{PNn_a\Phi}{60}$$

La même expression peut aussi s'appliquer aux induits à tambour, mais alors n_a se rapporte, non plus aux spires, mais aux fils comptés séparément sur la périphérie de l'armature, c'est-à-dire qu'une spire faisant tout le tour de l'armature, compte comme deux spires d'un induit Gramme.

Cette formule peut s'écrire $\Phi = \frac{E 60}{P N n_a}$

Si E est exprimé en volts, on a

$$\Phi = \frac{E \cdot 60 \cdot 10^8}{P N n_a} \quad (2)$$

La *f.e.m.* totale E , à développer dans le fil induit lorsque la machine travaille à pleine charge, se compose de la *f.e.m.* aux bornes, e , augmentée de la *f.e.m.* correspondant à la perte due à la résistance de l'induit $i_a r_a$; c'est-à-dire que

$$E = e + i_a r_a$$

C'est cette valeur qu'il convient de prendre dans la formule (2). On obtient ainsi le flux magnétique Φ qui pénètre dans l'induit, sous chaque pôle.

Il est à remarquer que ce flux se bifurque dans l'armature, de sorte que la section de fer nécessaire correspondra à un nombre $\frac{\Phi}{2}$ de lignes de force.

Quant à l'induction spécifique à adopter, on peut prendre des valeurs comprises entre 12000 et 18000 lignes de force par centimètre carré; ces valeurs se rapportent, naturellement, à l'espace réellement occupé par le fer. C'est-à-dire que dans le cas d'une âme constituée par du fil de fer (comme dans le classique anneau Gramme), le métal ne remplit guère que les $\frac{3}{4}$ de l'emplacement qu'elle occupe.

Dans le cas de disques de tôles, il faut compter sur l'épaisseur de l'isolant, papier ou vernis, et ne tabler que sur 80 à 85 % du volume total.

La longueur à donner à l'induit, suivant son axe, sera déterminée par certaines conditions qu'on ne peut donner comme absolues, mais de chacune desquelles il faut tenir compte.

Cette longueur varie naturellement suivant les types de machines.

Dans le cas d'induits à tambour, la longueur est généralement plus grande que le diamètre (2 fois, et même plus).

Dans les anneaux, le rapport entre la longueur et le diamètre est voisin de l'unité.

Il faut éviter que la densité du champ dans l'entrefer soit trop grande, afin de ne pas nécessiter une dépense exagérée dans l'excitation. D'après M. Arnoux, la meilleure utilisation des matériaux correspond à une surface d'entrefer telle que la densité du flux y soit comprise entre 2500 et 4000 lignes de force par centimètre carré.

L'épaisseur du fer mesurée suivant le rayon de l'armature ne doit pas être trop faible, sinon, pour une section donnée de fer, la longueur du fil induit devient trop grande, ce qui exagère la perte par effet Joule.

Cette perte, ajoutée aux courants de Foucault et à l'hystérésis, donne lieu à un échauffement de l'armature. Pour que cette élévation de température ne devienne pas nuisible pour les isolants, il faut que l'armature ait une surface exposée à l'air, suffisante pour que la chaleur produite puisse se dissiper par rayonnement ou par convection.

M. Esson a donné une formule empirique qui permet de prévoir l'élévation de température C^0 que prendra une armature, étant connus le nombre de watts transformés en chaleur (W), et la surface de refroidissement (S) tant intérieure qu'extérieure.

Voici cette formule :

$$C^0 = \frac{225 W}{S}$$

(C^0 , degrés centigrades ; S, surface en centimètres carrés).

Le coefficient 225 se rapporte à des armatures à anneau, à la vitesse périphérique d'environ 15 mètres.

Ces différentes considérations doivent intervenir dans le choix de la longueur de l'induit. Supposons-la

provisoirement fixée ; on en déduit l'épaisseur suivant le rayon, et l'on peut tracer un croquis de l'armature, sur lequel on mesurera la longueur d'une spire induite. Soit λ cette longueur ; s'il y a n_a spires en série, et si la section du fil est S_a , on aura pour la résistance de l'armature :

$$r_a = \frac{n_a \lambda}{2 C S_a}$$

C est le coefficient de conductibilité du métal, variable avec la température. Si I est le courant qui circule dans l'induit, la perte en volts devient :

$$I r_a = \frac{n_a I \lambda}{2 C S_a} \quad (3)$$

On sait que la résistance spécifique du cuivre pur est à 0° : 1,621 microhms centimètre.

Dans les salles de machines, où la température peut aller plus haut que 30°, il n'est pas rare de voir des induits atteindre et dépasser 65°. A cette température, le coefficient de résistance est voisin de 2, et le coefficient de conductibilité = 0,5. Comme c'est un chiffre commode et que d'ailleurs la température ne dépasse que rarement la valeur correspondante, nous adopterons 0,5 comme coefficient de conductibilité, dans le cas où les longueurs sont exprimées en centimètres. Si $n_a \lambda$ est exprimé en mètres, ce coefficient devient 50 et l'on a une formule plus générale :

$$E = \frac{M A}{50 S}$$

Si l'on voulait plus d'exactitude il faudrait prendre la formule

$$E = \frac{M A (1 + 0,0038 t)}{61,7 S}$$

On connaît ainsi la perte dans l'induit, et si elle ne diffère pas trop de ce que l'on s'est imposé, on l'adoptera provisoirement et l'on continuera les opérations.

Il s'agit maintenant de déterminer les données relatives à la production du champ magnétique. Nous suivrons évidemment la méthode d'Hopkinson. Comme on ne peut

déterminer d'avance le flux perdu, on se trouve dans l'incertitude quant au coefficient ν à adopter. Le mieux est de s'en rapporter aux valeurs trouvées dans des machines analogues. Une erreur dans cette estimation n'est pas très préjudiciable lorsque l'induction ne dépasse pas 12000 dans le fer ou 5000 dans la fonte des inducteurs, mais lorsque l'on adopte des densités de flux allant jusque 15000 et 18000 pour l'un et 9000 pour l'autre, il faut être prudent et adopter une valeur de ν plutôt trop élevée. On calcule les différentes sections du circuit magnétique en supposant ce coefficient le même partout, et en admettant que le flux dans l'entrefer est le même que dans l'armature.

Ayant fixé ce coefficient ν , on calcule les sections à donner aux différentes portions du circuit magnétique. Les longueurs de ces portions sont en partie déterminées par la forme même du type que l'on a choisi. Il y a cependant une certaine latitude dont on peut disposer pour arranger à son gré les longueurs des électros. Théoriquement, le circuit le plus court possible serait le meilleur ; cependant on est obligé de donner aux électros une certaine longueur pour que leur surface de refroidissement soit suffisante. A cet égard, on a dit longtemps qu'une surface de refroidissement de 10 à 12 centimètres carrés par watt était nécessaire, et qu'il ne fallait pas dépasser 2 ampères par millimètre carré ; ces renseignements ont été formulés d'une façon plus précise par M. Esson, qui a donné la formule suivante :

$$C^0 = \frac{355 W}{S}$$

exprimant que l'échauffement en degrés centigrades est égal au nombre de watts divisé par la surface en centimètres carrés et multiplié par un coefficient qui est 355 pour des bobines de moyenne épaisseur.

Cette formule, que j'ai trouvée pratiquement exacte, permet de déterminer la surface nécessaire pour n'avoir qu'un échauffement donné avec une perte donnée.

Toutes les dimensions du circuit magnétique étant fixées, on peut déterminer le nombre d'ampères-tours nécessaires pour y créer le flux magnétique voulu. Cela se fait par la méthode d'Hopkinson, que tout le monde connaît.

On sait qu'on a $4 \pi n i = \sum \frac{\Phi l}{\mu s}$

en représentant par l et s la longueur et la section du circuit, μ la perméabilité et Φ le flux magnétique.

On en tire

$$n i = \frac{1}{4 \pi} \sum \frac{\Phi l}{\mu s}$$

ou, si l'on exprime i en ampères

$$n a = \frac{1}{1,256} \sum \frac{\Phi l}{\mu s}$$

On connaît ainsi le nombre d'ampères-tours nécessaire pour exciter le champ magnétique. Ce nombre se rapporte naturellement à un seul circuit.

Il faut tenir compte de la position des bobines inductrices pour fixer le nombre d'ampères-tours total de l'excitation. Ainsi dans une machine de la forme du type supérieur de Gramme, on doit mettre sur chaque bobine la moitié du nombre total des ampères-tours nécessaires pour créer le champ, puisque ces deux bobines agissent sur le même circuit magnétique. Il n'en est pas de même dans le type Manchester, où chaque bobine doit avoir le nombre total d'ampères-tours donné par le calcul.

La même remarque s'applique aux machines multipolaires, où l'on doit distinguer le cas où les bobines sont portées par les pôles mêmes, de celui où elles sont enroulées sur la culasse ou anneau qui porte les pôles.

Lorsqu'on connaît le nombre total des ampères-tours nécessaires, on détermine facilement le fil à employer.

Nous avons établi, à l'occasion du calcul de la perte dans l'armature, la formule

$$E = \frac{M A}{50.S}$$

en l'écrivant $S = \frac{M A}{50 E}$ nous pourrons la faire servir au calcul du fil des inducteurs. En effet, ainsi transformée, elle donne la section S du fil de cuivre d'une longueur de M mètres, dans lequel une force électro-motrice E fait passer un courant de A ampères.

Le produit MA , que nous pouvons appeler mètres-ampères, nous est connu: c'est le produit du nombre total d'ampères-tours par la longueur en mètres d'une spire moyenne des inducteurs, longueur qui peut être relevée sur le croquis préliminaire.

Nous connaissons également E : c'est ici la *f.e.m.* aux bornes de la dynamo. Il est donc aisé de déterminer la section du fil à employer.

On voit que cette section ne dépend que du nombre de mètres-ampères nécessaires et de la force électro-motrice disponible. Le nombre des ampères-tours ne variera pas, quel que soit le nombre des spires. En effet, si l'on augmente ce nombre, la résistance augmente aussi, et l'intensité du courant diminue dans le même rapport.

Comme la température des inducteurs est en général un peu inférieure à celle de l'induit, on peut prendre le coefficient de conductibilité un peu plus élevé, par exemple 52 ou 53, au lieu de 50.

Dans ce qui précède, nous n'avons tenu compte ni du décalage, ni de la réaction d'induit. Les sections du circuit magnétique, les spires de l'armature et des inducteurs ont été calculées comme si la machine ne devait donner qu'à vide, un nombre de volts correspondant au voltage normal augmenté des volts qui seraient perdus dans l'armature, si elle était traversée par le courant maximum.

Or, pendant la marche à vide, le décalage est à peu près nul et les spires de l'armature, traversées seulement par le courant qu'elles fournissent aux inducteurs, ont peu d'in-

fluence sur le champ. Mais à mesure qu'on charge la machine, et qu'on est obligé de décaler les balais, ces spires produisent de plus en plus de courant. Leur action devient alors appréciable. Une partie n'agit que pour créer une induction transversale dans les pièces polaires, l'autre agit directement en sens contraire des inducteurs, affaiblissant ainsi le champ.

Il en résulte que pour combattre l'effet de ces contre-ampères-tours, il nous faut donner un supplément d'excitation que l'on peut évaluer de 25 à 35 % dans les armatures à anneau, et de 10 à 15 % dans les induits à tambour.

Il y a encore, il est vrai, d'autres causes de diminution de la *f.e.m.*, mais elles sont moins importantes, et si l'on n'a pas été trop rigoureux dans le calcul des dimensions du circuit magnétique, elles auront peu d'influence.

Nous prendrons donc un chiffre de mètres-ampères d'environ 30 % supérieur à celui que nous avons trouvé précédemment, et c'est ce chiffre que nous emploierons dans la formule

$$S = \frac{M A}{50E}$$

Le fil isolé de deux couches de coton gomme-laqué a environ 0,^{mm}6 de plus en diamètre que le fil nu.

On peut calculer combien de spires juxtaposées pourront prendre place sur chaque bobine, et combien de couches on pourra en mettre. Ainsi s'obtient le nombre de spires, et par conséquent la longueur totale *M* du fil inducteur. Sachant, d'autre part, que ce fil donne *MA* mètres-ampères on en tire la valeur du courant d'excitation; il faut alors voir si la perte en watts ne dépasse pas la limite admise et ne donne pas lieu à un échauffement trop considérable.

Une machine ainsi calculée marcherait à coup sûr, et donnerait approximativement ce qu'on en attend, mais il est plus que probable qu'on n'arrivera pas du premier coup à la faire parfaite.

Il faudra donc faire plusieurs projets avec des conditions un peu variées, augmenter par ci, diminuer par là, puis choisir la meilleure solution. On est d'ailleurs guidé dans les changements à faire subir aux données, par les défauts mêmes des projets précédents. Ainsi telle disposition qui nécessitait une excitation considérable, et ne donnait qu'une faible perte dans l'induit, sera avantageusement modifiée si l'on augmente le nombre de spires sur l'armature, ce qui augmente un peu la perte $I^2 r_a$, mais aussi diminue le champ à produire, et par conséquent la dépense d'excitation.

Le projet définitif une fois adopté, il faut s'occuper des questions secondaires, du collecteur, de la manière de loger les fils à l'intérieur de l'anneau, des détails de construction, etc.

Ensuite, il ne reste plus qu'à faire construire la dynamo et à l'essayer. Pour que cet essai soit instructif, il faut que l'on connaisse exactement toutes les dimensions de la machine. Pour l'entrefer, par exemple, on ne peut se contenter de prendre la cote du dessin ; on doit relever sur place l'alésage du bâti et l'extérieur du fer de l'armature, avant le bobinage.

Si l'armature est en fil de fer, il faut connaître le nombre de spires qui ont été enroulées. Si elle est en tôles, on tiendra note du nombre et de l'épaisseur moyenne de celles-ci.

Ces mesures ont pour but de faire connaître la section de fer offerte au flux magnétique. Il faut aussi connaître le nombre de spires enroulées sur les inducteurs, nombre qui doit être le même sur chaque bobine. Le fil inducteur de cette machine d'essai sera un peu plus gros que celui qui a été déterminé par le calcul, afin de pouvoir donner au besoin plus d'excitation qu'on ne l'a prévu.

On doit généralement, une première fois, exciter séparément les inducteurs. Par la suite, le bâti conserve généralement assez de magnétisme rémanent pour que la machine, en tournant, développe une certaine *f.e.m.*

Les connexions entre les inducteurs et les bornes de la dymano doivent être faites de manière que le courant d'excitation donne un champ de même direction que celui dû au magnétisme rémanent, sinon la machine ne s'amorce pas. Il est donc utile de savoir quel sera le sens du courant développé dans l'armature, ou, si l'on veut, quels seront les balais positifs et les balais négatifs, lorsque l'on a excité au préalable les inducteurs avec un courant de sens déterminé.

Le moyen le plus commode pour déterminer le sens du courant dans un conducteur se mouvant dans un champ magnétique est, à mon avis, la règle des trois doigts.

J'en ai dit un mot à l'occasion de la discussion de la note de M. Cruciani, à la séance du 26 octobre dernier. J'y reviens aujourd'hui pour compléter ce qui en a été dit au procès-verbal.

On sait que les trois directions : champ magnétique, sens du courant et direction du mouvement, sont à angles droits.

On peut figurer un trièdre en étendant l'index et le pouce parallèlement à la paume de la main et les ouvrant à angle droit, puis en dirigeant le médius perpendiculairement à la paume de la main. On réalise ainsi grossièrement trois lignes perpendiculaires qui représenteront respectivement le sens du courant, celui du déplacement et celui des lignes de force magnétiques.

La main gauche doit être employée pour le cas où c'est le déplacement du conducteur qui donne lieu au courant induit : tel est le cas d'une dynamo.

Pour le cas d'un moteur, il faut employer la main droite.

En tendant les deux mains de façon à orienter les médius et les index dans la même direction, il est facile de voir que les pouces sont dirigés en sens opposé, ce qui est conforme aux principes de l'électro-magnétisme.

Si l'on connaît le sens de l'aimantation du bâti, on pourra ainsi déterminer quels sont les balais positifs.

L'essai fera connaître les qualités et les défauts de la machine. Il en indiquera les modifications nécessaires ou utiles, et permettra, s'il y a lieu, de déterminer avec exactitude l'enroulement compound.

M. de Weydlich, *Président*. — La discussion est ouverte sur la communication de M. Bayet, relative aux conditions d'installation des stations centrales.

M. L'Hoest. — Notre camarade, en terminant sa communication, a exprimé le désir de la voir discuter dans ses moindres détails.

Le sujet qu'il a courageusement abordé est très-vaste car il touche à plusieurs spécialités techniques; je crois donc aujourd'hui devoir me limiter, dans les quelques considérations que je vais développer, à la partie de l'installation d'une station centrale qui comprend le générateur de vapeur et ses accessoires.

M. Bayet a exposé les conditions que doit remplir le type de chaudière d'une station centrale de grande ville, conditions qu'il trouve le plus complètement réunies dans la chaudière multitubulaire du modèle classique de Belleville. Certes, ce modèle jouit à bon droit d'une grande réputation; c'est, je pense, dans ce générateur qu'on a pu pousser le plus loin le fractionnement des divers éléments; à ce titre, il mérite tout le succès qu'il a rencontré dans la petite industrie parisienne où l'on doit parfois résoudre le problème du passage du chameau à travers le chas d'une aiguille.

Mais est-on vraiment réduit à cette extrémité dans les stations centrales? Doit-on renoncer, par exemple, à y faire usage de chaudières telles que la chaudière tubulaire ou de locomotive qui peut aisément se décomposer en colis comparables en volume au piano qui se hisse aujourd'hui jusqu'à la mansarde? Ce serait évidemment outrer

les conditions déjà bien exclusives que notre camarade nous a énumérées et je pense qu'il ne serait pas oiseux d'examiner concurremment, au point de vue de leur utilisation dans les stations centrales, la chaudière multitubulaire et la chaudière dite de locomotive.

Cette dernière est divisible en trois pièces principales: le foyer, le corps cylindrique qui peut être assemblé au premier par un joint à collet, et la boîte à fumée simplement clavetée sur le corps cylindrique. Les tubes bouilleurs, le dôme et la garniture peuvent être considérés comme des accessoires à monter sur place.

La mise en pression de la chaudière tubulaire est très-rapide, surtout si l'on fait usage du tirage forcé et d'un combustible bien approprié. Sous ce rapport, la chaudière tubulaire, bien que possédant une grande réserve d'eau, ne sera pas inférieure à la chaudière multitubulaire.

Il n'est pas besoin de dire que le type tubulaire, constamment soumis aux variations de pression lorsqu'il est appliqué à la locomotion, ayant à passer à chaque instant du débit le plus élevé à l'arrêt absolu sans soufflage des soupapes, réalise encore le type le plus parfait de la chaudière élastique tant au point de vue de sa construction que de son débit. Rappelons à cette occasion que malgré de nombreuses et intelligentes tentatives, la chaudière multitubulaire n'est point parvenue à supplanter la chaudière Seguin dans la locomotive.

La chaudière tubulaire est de faible poids et, sous ce rapport, elle n'a pas à souffrir de sa comparaison avec la chaudière Belleville. Son timbre est fréquemment porté à douze atmosphères et, dans ces conditions encore, elle reste aussi inexplosible que le type multitubulaire.

Pour mieux préciser les conditions d'établissement et de production de la chaudière tubulaire, je prendrai l'exemple du générateur de la machine type 25 de l'État Belge.

La surface de chauffe en est de 120m^2 , le timbre de 10 atmosphères et la surface de grille de 5m^2 . Dans des expériences faites à Anvers en 1885, on a obtenu une vaporisation de 90 kilogrammes d'eau par mètre carré.

En n'admettant qu'une pression de 30 m/m d'eau au vent soufflé, ce chiffre serait notablement réduit, mais il ne serait pas inférieur à 30 kilogrammes. Dans ces conditions le générateur produirait 3600 kilogrammes à l'heure.

L'emplacement qu'il exige n'est que de $14\text{m}^2 50$ en plan; de plus il occupe peu de volume, grâce à sa faible hauteur, ne demande pas de maçonnerie et peut s'installer sur colonnes. Le poids total de la chaudière est de 12500 kilogrammes et son prix (foyer en cuivre, tubes en fer) est de 15000 francs environ.

Ramenés à l'unité de production, le kilogramme d'eau vaporisée, l'emplacement n'est que de 40 centimètres carrés, le poids de 4 k. 5 et le prix de 5 fr. 40. Ces chiffres, on le voit, sont tout à l'avantage de la chaudière tubulaire.

La consommation de charbon est aussi très économique: on compte généralement sur une vaporisation de $8^k 5$ par kilogramme de charbon net, soit $7^k 5$ par kilogramme de charbon brut de médiocre qualité.

La chaudière tubulaire présente, en outre, un avantage plus marqué encore que ceux qui précèdent; nous voulons parler de l'entraînement d'eau si considérable dans les chaudières multitubulaires et presque nul dans les locomotives. Or, ce n'est pas seulement la bonne utilisation du combustible qui est amoindrie par l'entraînement d'eau; la conservation du moteur, surtout s'il est à grande vitesse, en est fort compromise, particulièrement au moment de la mise en marche, ou lorsqu'on force la production.

On pourrait objecter à ces données qu'elles se rapportent à un type puissant tel qu'on n'en emploie guère dans les stations centrales, où les allumages et les extinc-

tions de chaudières doivent suivre journellement l'accroissement et la diminution de la demande. Mais, nous l'avons fait remarquer, l'élasticité de production de la chaudière tubulaire est considérable, en sorte qu'il ne sera guère plus coûteux de demander à un tel générateur un léger appoint de production que de l'utiliser dans les conditions de sa marche intense.

Au surplus, ce serait une erreur de croire que les qualités précieuses du type tubulaire à grande puissance se perdent sensiblement lors qu'on en réduit notablement les dimensions. Aux *Ateliers de la Meuse*, on construit en ce moment de petites chaudières du type tubulaire pour le service des phares électriques des forts de la Meuse. Ces chaudières occupent en plan un espace de $2^m80 \times 1^m00$ maximum et, avec une chauffe de 20 mètres carrés, produiraient aisément 40 chevaux utiles, ou 600 kilogrammes de vapeur sèche à l'heure. Rapporté au kilogramme de vapeur, l'emplacement serait de 47 centimètres carrés, chiffre peu supérieur à celui que nous avons trouvé pour le générateur à grande puissance.

M. Bayet. — Je ne conteste pas l'inconvénient de l'entraînement de l'eau dans les chaudières Belleville; aussi, tous les chiffres cités dans la dernière séance se rapportent-ils aux générateurs Babcock et Wilcox ou de Naeyer dont l'allure est plus calme et le prix moins élevé.

Nous avons fait usage à Paris de chaudières de locomotive et nous en avons éprouvé beaucoup d'ennuis parceque ce type demande des chauffeurs habiles et soigneux. Avec de bons chauffeurs la chaudière tubulaire est certainement supérieure aux chaudières multitubulaires.

M. L'Hoest. — Nous parvenons assez rapidement à former les chauffeurs de locomotives, bien que, je le reconnais, leur service réclame des soins et de l'intelligence.

M. Bayet expose ensuite en ces termes sa communication intitulée :

Transport de l'énergie par les courants alternatifs.

Le transport et la distribution de l'énergie à l'intérieur des villes, est une question vivement débattue et qui mérite la plus sérieuse attention. Pour juger deux systèmes de transport en présence, on se borne la plupart du temps à déterminer pour chacun d'eux le rendement de transport, et on admet comme axiôme que le meilleur système est celui qui donne le meilleur rendement. Le rendement de transport est certes un rapport intéressant à connaître, mais il ne permet pas de juger les systèmes en concurrence. Comment déterminerait-on ce rendement pour le moteur à gaz et pour le moteur à pétrole?

Le prix de revient du cheval utile vendu à l'abonné est le vrai critérium de la question, et c'est justement ce qui empêche de résoudre la question d'une manière générale, parce que, par suite de conditions particulières, un système peut parfaitement réussir dans un endroit, et être mauvais autre part.

Indépendamment du prix de revient, il faut que le procédé de transport soit tel, qu'il permette de résoudre tous les problèmes de la pratique. Actuellement deux agents sont en lutte : l'air comprimé et l'électricité.

L'air comprimé est, sans aucun doute, le plus commode de tous les agents de transport ; il ne craint ni le feu, ni la gelée, ni l'eau et il est sans danger.

L'aéromoteur n'est que le moteur à vapeur ordinaire dans le cylindre duquel on introduit de l'air au lieu de vapeur : les machines à vapeur existantes pourront donc nous servir, ce qui sera un avantage marqué. Avec l'air comprimé nous pourrons donc faire tout ce qu'on fait à l'aide de la vapeur et alimenter depuis la plus petite force

jusqu'à la plus grande sans la moindre difficulté. De plus, l'air comprimé permet le transport à grande distance et peut donc servir à l'utilisation des forces naturelles.

Malgré tous ces avantages, je me propose de montrer dans ce qui suit que l'électricité l'emporte sur l'air au point de vue du prix de revient et què, si nous nous plaçons dans les conditions pratiques de la question, à savoir que toutes les villes d'une certaine importance doivent avoir une distribution de force motrice, l'électricité seule donne une solution convenable.

Comme nous avons à déterminer le prix de revient du cheval utile vendu à l'abonné, nous devons nous proposer un problème bien déterminé, que nous résoudrons à l'aide de chaque système de transport.

Considérons une usine d'une force de 5000 chevaux-vapeur indiqués, distribuant la force dans un rayon de 5000 mètres; supposons que 30 kilomètres d'une canalisation capable de distribuer la moitié de la force de l'usine soient nécessaires; ensuite que la houille vaut 20 francs la tonne. Par cheval indiqué aux cylindres, nous en consommerons 1,5 kilog. Le bénéfice annuel d'une pareille usine devra atteindre 15 % du capital.

La durée de marche des moteurs est en moyenne de 10 heures; mais comme il y a un certain nombre de moteurs qui ont une durée de marche plus grande, que, d'autre part, tous les moteurs ne seront jamais en marche en même temps (ce qui nous permettra d'en prendre une proportion plus grande que ne paraît le permettre la force nominale de l'usine), nous pouvons compter que le rendement de l'usine sera de 50 %, c'est-à-dire qu'il correspondra à une marche normale de 12 heures par jour.

En tenant compte de ces conditions, on trouve que l'on pourrait vendre le mètre cube d'air comprimé à 0,85 centimes.

Le moteur à air froid donnerait un rendement de transport de 46 %, et dépenserait par cheval utile 25,50 mètres cubes; le prix du cheval utile serait donc de 21,7 centimes.

Le moteur marchant à air chaud donnerait un rendement de transport de 68 % et dépenserait par cheval utile 17,37^{m³} d'air, de plus le réchauffage de l'air occasionnerait une dépense de 154 grammes de coke, coûtant par exemple 3 centimes le kilogramme. Le prix du cheval utile à air chaud serait donc de 15,25 centimes.

Une remarque importante, qui ressort de l'étude de la transmission de la force par l'air comprimé, c'est que tel système, étant bon pour de petites forces, peut devenir mauvais quand la force à transporter est considérable. Ainsi, la résistance qu'éprouve l'air dans les tuyaux varie en raison inverse de la 5^e puissance du diamètre; il s'ensuit que la canalisation d'air sera beaucoup plus favorable pour de grandes forces que pour de petites.

Par contre, pour l'électricité, si la force est petite, un fil télégraphique peut suffire. Mais si la force est trop considérable, il peut se faire que le diamètre et le poids des câbles deviennent tels, qu'il serait fort difficile d'établir une ligne aérienne, à moins que d'augmenter considérablement le voltage, ce que les courants alternatifs permettent de faire sans danger.

En Belgique, dans plusieurs villes, le prix du mètre cube de gaz est de 15 centimes, et comme un mètre cube donne un cheval, le cheval utile produit par un moteur de l'espèce coûte 15 centimes de gaz.

Le moteur à pétrole, qui ne peut s'employer que pour de petites forces, dépense un demi-litre par cheval, et comme le litre de pétrole vaut de 10 à 15 centimes, le coût en pétrole du cheval sera de 5 à 7,5 centimes.

Cherchons maintenant à quel prix nous pourrions vendre le cheval utile par l'électricité.

Pour résoudre le problème que nous avons énoncé plus haut, c'est-à-dire distribuer la force dans un rayon de 5000 mètres, il n'y a qu'un seul système de distribution électrique qui convienne, c'est celui par courants alternatifs avec un transformateur par abonné. On peut donc dire qu'il y a quelques années la distribution de la force motrice dans toute une ville par l'électricité, était chose impossible à réaliser industriellement, le moteur à courants alternatifs n'existant pas.

Examinons avant tout les avantages et inconvénients de l'électricité, comme agent de transport.

L'électricité est par excellence l'agent de transport à longue distance. Mais pour l'employer nous devons éviter qu'il puisse y avoir le moindre danger pour les personnes se servant des moteurs; les moteurs marcheront donc à un voltage réduit: les réglemens de police, du reste, nous y obligent.

L'installation du moteur électrique coûte cher. Ainsi prenons un moteur d'une puissance de 50 chevaux coûtant par cheval 180 à 190 francs; le transformateur d'une puissance de 50 chevaux coûtera 6 centimes au watt; comme avec un moteur ayant un rendement de 90 %, il faut 820 watts par cheval, le prix du transformateur par cheval utile sera de 49 francs et le coût total d'un cheval utile de 230 à 240 francs; notons que pour un moteur à air comprimé il sera seulement de 125 à 150 francs.

Mais l'espace occupé par le moteur électrique est moindre que pour le moteur à air: le massif de maçonnerie sur lequel le moteur est assis coûtera donc moins cher; malgré cela l'installation d'un moteur électrique sera plus onéreuse que celle d'un moteur à air.

Un autre désavantage du moteur électrique, c'est le grand nombre de tours qu'il fait par minute, ce qui nous oblige, pour en utiliser la force, à nous servir d'un intermédiaire, soit l'engrenage, soit la transmission par courroies, etc.

Le moteur électrique demande beaucoup plus de soins que tous les autres systèmes de moteurs ; l'humidité et la poussière lui sont très nuisibles ; de plus, il faut une certaine pratique pour s'en servir, car une erreur, un accident, suffisent pour brûler, en un instant, une ou plusieurs sections de la bobine. Quand cela sera possible, on donnera donc toujours la préférence aux moteurs ayant l'armature fixe et le champ magnétique tournant, ce qui permet la visite de l'armature, et le remplacement facile et rapide d'une section.

Un des grands avantages du moteur électrique c'est de pouvoir marcher quand on le veut sans préparatif aucun ; dès que nous n'avons plus besoin de la force nous pourrons donc arrêter le moteur. On a souvent parlé de la suppression des courroies dans un atelier, par l'attaque directe des différentes machines à mouvoir par de petits moteurs électriques. Il convient cependant de ne pas donner trop d'importance à cette solution, car en règle générale, les frais nécessités par les modifications à apporter à une installation existante seront trop considérables. Au lieu de supprimer toutes les courroies, nous ne supprimerons donc que celles commandant des groupes de machines ; nous pourrons actionner chaque groupe par un moteur électrique sans trop de frais, ni difficulté, car nous le répétons, le moteur électrique occupe peu de place et peut parfaitement se mettre à l'étage si cela est nécessaire.

Nous avons dit que nous emploierons les moteurs à courants alternatifs.

Actuellement on en connaît de trois espèces, savoir : 1^o le moteur synchronique ; 2^o le moteur à flux inducteur périodique, et 3^o le moteur à flux inducteur tournant.

Le moteur synchronique est le seul permettant actuellement de développer une certaine puissance ; mais il faut le mettre en marche à la main, ou, par un moyen quelconque, le mettre en vitesse à vide et ne pas le soumettre

à une charge trop élevée, de peur de le faire tomber hors de phase.

Nous devons distinguer le cas des petits moteurs, de celui des grands moteurs.

Pour les petits moteurs nous ne pouvons avoir l'excitatrice séparée ; le prix de telles machines serait trop élevé, et le rendement trop mauvais.

Nous devons donc redresser les courants alternatifs pour alimenter les inducteurs : c'est ce qui a lieu dans le moteur Ganz par exemple. Seulement pour faire marcher les moteurs à un nombre de tours pas trop élevé, on a été obligé d'abaisser la périodicité du courant.

Ainsi la maison Ganz a adopté le chiffre de 42 ondulations doubles par seconde pour pouvoir faire marcher des moteurs à 4 pôles, à 1250 tours par minute ; tandis que si la périodicité eût été de 100, les mêmes moteurs eussent marché à 2950 tours, à moins que d'avoir 10 pôles, ce qui n'est pas praticable pour de petits moteurs. L'abaissement de la périodicité a pour effet d'augmenter le prix, tout en diminuant le rendement, comme l'a montré Mordey.

Les moteurs à flux inducteur tournant donnent des petits moteurs plus simples, mais on ne sait rien encore, quant à leur rendement.

Pour des moteurs d'une certaine puissance, la mise en marche à la main n'est plus pratique ; d'un autre côté, on peut avoir une excitatrice séparée qui n'augmente pas beaucoup le prix d'achat.

En couplant l'axe du moteur avec celui de l'excitatrice, on peut se servir de cette dernière pour la mise en marche. Ainsi Mordey emploie une excitatrice en dérivation et opère la mise en marche au moyen d'une batterie d'accumulateurs.

Il y a un moyen plus simple et qui permet de supprimer la batterie d'accumulateurs, c'est d'employer une excitatrice en série ; celle-ci peut servir de moteur à courants alternatifs pour opérer la mise en marche.

Si donc on met sur le transformateur un second circuit secondaire pour l'excitatrice, ou si on prend une partie du secondaire correspondant au voltage de l'excitatrice, on pourra mettre le moteur en marche ; puis au moyen d'un commutateur on établira les choses dans un état normal.

On a donc actuellement des moteurs à courants alternatifs permettant d'alimenter tout système n'exigeant pas que la charge soit sur le moteur à la mise en marche.

Rendement de transport à 5000 mètres. — Le rendement de transport est facile à trouver.

Le rendement de la dynamo est de	90 %
» du transformateur, de	90 %
» du moteur, de	90 %
» de la canalisation	87,5 %

Le rendement de transport est donc :

$$0,9.0,9.0,9.0,875 = 0,638.$$

Nous supposons que le voltage à l'usine est 3000 volts, et la densité de courant dans les câbles, 2 ampères par millimètre carré.

Pour le problème qui nous occupe, la densité de courant dans les câbles a été déterminée par tâtonnement afin d'obtenir le meilleur prix de revient du cheval utile.

Occupons-nous de la détermination du prix de revient.

L'usine a une force de 5000 chevaux indiqués ; comme nous employons des machines à vapeur rapides permettant

le couplage direct avec les alternateurs, et ayant un rendement de 90 %, le nombre de chevaux utiles est de $5000 \times 0,9 = 4500$ et le nombre de chevaux électriques $4500 \times 0,9 = 4050$, le rendement des alternateurs étant de 90 %.

Le coût du premier établissement du cheval-vapeur est de fr. 180, celui de l'alternateur de fr. 111 par cheval électrique. Le coût de canalisation se compose du prix d'achat des câbles, plus 10 francs par mètre pour les frais de pose. On a donc comme frais de première installation pour une usine de 5000 chevaux vapeur indiqués.

Machines à vapeur, 4500 chevaux à fr. 180	fr. 810 000
Dynamos, 4050 chevaux électriques à fr. 111	» 450 000
Tuyauterie, tableau, appareils de réglage, etc., à fr. 100 par cheval indiqué . . .	» 500 000
Terrain, 2000 mètres carrés à fr. 50. . .	» 100 000
Maçonnerie à raison de fr. 40 par cheval indiqué	» 200 000
Frais de montage et imprévus	» 250 000
	fr. 2310 000
Canalisation	» 1141 000
	fr. 3451 000

L'usine proprement dite coûte donc : 462 francs par cheval vapeur indiqué, ou 513,30 francs par cheval vapeur utile, ou encore 570 francs par cheval électrique.

Nous prendrons 10 % comme taux d'intérêt et d'amortissement pour les machines, dynamos, et la canalisation ; pour le reste nous admettrons 7 %.

Intérêts et amortissement à 10 % . .	fr. 240 100
» » à 7 % . . .	» 73 500
	fr. 313 600

Frais de l'usine par jour. — Nous produisons $5\,000 \times 12 = 60\,000$ chevaux vapeur indiqués par jour. Par cheval vapeur indiqué nous consommons 1,5 kilog. de charbon, soit pour toute l'usine 90 tonnes à 20 francs par jour $90 \times 20 = \text{fr. } 1\,800$

Huiles, chiffons, etc., à 3 centimes par cheval vapeur indiqué, soit $5\,000 \times 12 \text{ à } 0,03 = \text{» } 180$

Frais d'éclairage, réparations, etc . . . » 50

» 2 030

Dépenses par mois :

Intérêt et amortissement.	fr.	26 000
Frais de l'usine	»	61 000
Personnel de l'usine	»	8 000
Administration	»	10 000
	fr.	105 000

Le nombre de kilowatts produits par mois, sera de :

$$\frac{5\,000 \times 12 \times 30 \times 376 \times 0,638}{1\,000} = 845\,200 \text{ Kw.}$$

Le prix de revient sera donc $\frac{105\,000}{845\,200} = \text{fr. } 0,1241$.

Le prix de vente se trouve, en comptant sur un gain annuel égal à 15 % du capital engagé ; on trouverait ainsi pour le prix de vente du kilowatt 18 centimes.

Le prix du cheval utile avec des moteurs donnant 90 % de rendement, ce qui demande $\frac{0,736}{0,9} = 0,818 \text{ Kw}$, sera de $0,818 \times 18 \text{ cent.} = 14,73 \text{ cent.}$

Le cheval utile reviendra donc à 14,73 cent. tandis que par l'air comprimé, on arrive à 15,25 cent., par le gaz à 15 cent. et par le pétrole à 7,5 cent.

Le transport de la force par l'électricité est donc égal au transport par l'air comprimé. Mais la pratique vient ici nous enseigner un fait important, c'est que dans la plus grande partie des cas, une usine destinée au transport de la force n'a aucune chance de réussite. Les moteurs dans une ville sont trop dispersés, et, en outre, se trouvent dans les faubourgs ; la canalisation deviendrait donc trop coûteuse. De plus le prix de revient du cheval utile est beaucoup plus grand que celui du cheval vapeur, quel que soit le mode de transport que nous employons ; par raison d'économie on aura donc tout intérêt à employer la vapeur pour des moteurs d'une certaine force, et la raison d'économie qui prime tout, empêchera encore la distribution de la force de prendre de l'importance.

Ce qui le prouve bien c'est le cas du moteur à gaz ; le prix du cheval utile dans certaines villes est avec ce système de 15 centimes, et la distribution de gaz existant partout, on peut mettre des moteurs en n'importe quel point de la ville ; nous ne voyons pas cependant, qu'il y en ait une quantité notable.

En règle générale, il n'y a donc pas lieu d'établir une usine spéciale de transport de force. Il y a cependant des cas où une telle installation s'impose et peut parfaitement réussir. Dans les ports de mer d'une certaine importance par exemple, il faut une distribution de force pour la manœuvre des écluses, des ponts-tournants, des grues, des ascenseurs, des monte-charges, des élévateurs, des pompes, et on est obligé d'abandonner le moteur à vapeur, à cause des dangers d'incendie résultant de la présence des chaudières dans les docks et entrepôts. Dans ce cas, la distribution de la force, devra se faire dans un espace nettement défini et relativement restreint. De plus, le prix du cheval importe peu, la plupart des machines étant à marche intermittente.

Etant donnée l'élasticité de l'air comprimé à se plier à toutes les exigences, et en outre cette qualité précieuse, que toutes les machines à vapeur existantes, peu ou point modifiées, pourront parfaitement nous servir, c'est l'air comprimé qu'il faut employer et non l'électricité.

Si dans le plus grand nombre de villes, nous ne pouvons pas établir d'usine spéciale de transport de force, nous seront cependant obligés de faire l'éclairage des villes, et si l'éclairage électrique existe, le problème change de face.

Pour établir le prix de vente du kilowatt, nous n'avons pas compté sur les moteurs électriques ; l'usine est donc payée par l'éclairage, ainsi que le personnel de l'administration et les frais d'intérêt et d'amortissement.

Pour ne pas augmenter le capital engagé, en d'autres termes pour ne pas agrandir l'usine, nous ne prendrons en moteurs électriques qu'une certaine proportion de la force nominale de l'usine, pour qu'en hiver, de 4 à 7 heures du soir, alors que l'éclairage et la force motrice se rencontrent, nous puissions suffire à la demande sans trop forcer les machines ; nous ne prendrons donc que 25 % au maximum de la force de l'usine en moteurs.

Mais, dans ces conditions, nous pourrions vendre le cheval électrique à fort bon marché, c'est-à-dire avoir un tarif réduit pour la force motrice. Si nous nous reportons aux chiffres que j'ai donnés plus haut, nous verrons que, par cheval indiqué, les dépenses de l'usine s'élevaient à $\frac{2030 \text{ francs}}{5000 \times 12} = 3,4 \text{ cent}^{\text{mes}}$; soit par cheval utile $\frac{3,4}{0,9} = 3,8$; le rendement de transport étant 63,87, le cheval utile fourni à l'abonné, nous coûte $\frac{3,8 \text{ centimes}}{0,638} = 5,9$ soit 6 centimes.

Si la demande en moteurs est trop grande, nous serons obligés d'installer à l'usine des machines supplémentaires,

mais encore une fois, la canalisation reste la même et les frais sont payés par l'éclairage.

Le rendement de transport étant de 63,8 %, et le rendement mécanique des machines à vapeur actionnant les alternateurs étant de 90 %, le rendement entre le cheval-vapeur indiqué aux cylindres à l'usine et le cheval utile chez l'abonné est de $63,8 \times 90 = 57,42$ %, autrement dit l'installation d'un cheval moteur en ville demande l'installation de $\frac{1}{0,5742} = 1,74$ cheval-vapeur indiqué à l'usine. Nous avons vu que le prix d'installation par cheval indiqué pour l'usine était de 462 francs, de plus que ce capital exige un intérêt et un amortissement de 10 %, et que le bénéfice annuel doit être de 15 % du capital. Si nous admettons que 1,74 cheval indiqué à l'usine produit $360 \times 12 = 4320$ chevaux-heures utiles vendus par an, nous trouvons que le prix de vente du cheval utile doit être 10,60, soit de 11 centimes.

A Paris, il existe une distribution de la force par l'air comprimé, d'une puissance de 5000 chevaux vapeur indiqués (à l'usine), et on est occupé d'en monter une deuxième dont la force sera de 8000 chevaux vapeur indiqués. Ne pouvant trouver assez de force motrice pour alimenter l'usine, on a fait de l'éclairage électrique par l'air comprimé !

Nous savons que M. Van Rysselberghe a proposé à Bruxelles de faire de l'éclairage électrique meilleur marché que par n'importe quel système de distribution électrique, en comprimant de l'eau qui actionnerait chez chaque abonné une dynamo au moyen d'un tourniquet hydraulique. L'air comprimé étant un agent de transport beaucoup plus efficace que l'eau sous pression et permettant de vendre le cheval utile à un prix bien plus bas, examinons si on peut en effet obtenir l'éclairage électrique à un prix de revient raisonnable par un tel système.

Voyons par exemple ce qui se passe à Paris où les différents secteurs électriques fournissent le kilowatt à à fr. 1,20. Le mètre cube d'air coûte 1,5 centime et le kilogramme de coke 5 centimes.

Le moteur à air chaud dépense 17^m37 d'air et 154 grammes de coke par heure et par cheval. Le prix d'installation par cheval sera de 600 francs ; la dynamo aura un rendement de 80 %, et la durée d'éclairage sera de 3 heures par jour.

Par an nous produirons donc pour un cheval utile

$$\frac{360 \times 3 \times 736 \times 0,8}{1000} = 636 \text{ Kw.}$$

Le cheval air comprimé coûte à Paris

$$\begin{array}{r} 17,37^m3 \text{ à } 1^c,5 = 26^c,10 \\ 0,154 \text{ coke à } 5^{\text{cent.}} \text{ le kg.} = 0,77 \\ \hline 26^c,87 \end{array}$$

Par an nous produisons 1080 chevaux-heures qui nous coûtent

$$\begin{array}{r} 1080 \times 26^c,87 = \text{fr. } 290,20 \\ \text{Huile à } 1 \text{ cent. par chev.} = \text{» } 10,80 \\ \hline \text{» } 301,00 \end{array}$$

Si nous admettons un taux d'intérêt et d'amortissement de 20 % pour le capital engagé et une somme de 20 francs par cheval pour les réparations annuelles, le prix du cheval annuel produisant 636 Kw est de

$$301 + 20 + 120 = 441,00 \text{ francs}$$

et le Kw coûte

$$\frac{441,00}{636} = \text{fr. } 0,694.$$

La lampe de 16 bougies consomme 60 watts à l'heure, la bougie demande donc $\frac{60}{16} = 3,75$ w.; un bec de gaz brûle 12 litres par bougie; de là, nous trouvons que le Kw vendu à fr. 0,695 correspond à un prix du m³ de gaz de 22 centimes.

Donc, par l'air comprimé, le Kw reviendrait à fr. 0,69, tandis que l'électricité fournie par les divers secteurs électriques coûte fr. 1,20. Ces chiffres sont faits pour éblouir bien des gens, et cependant ce système ne vaut rien, car il n'est pas pratique. Un moteur et une dynamo demandent des soins; il faut donc un homme qui passe un certain temps à graisser et nettoyer le moteur, à tailler, et caler les balais de la dynamo; on doit trouver une place pour loger le moteur; de plus il serait nécessaire de faire entrer dans les calculs, la perte de rendement considérable qu'on a en marchant presque à vide la plus grande partie de la journée; on conseillera même d'éclairer au gaz pendant ce temps là. Il n'y a que les grands établissements, les cafés, les théâtres, les grands magasins ou fabriques qui puissent employer l'éclairage électrique dans ces conditions.

Ce n'est pas un système sérieux.

En résumé, il ne reste qu'un seul système qui permette la distribution de la force dans toutes les villes, et cela en fournissant le cheval à un prix relativement bas, c'est l'électricité.

Utilisation des forces naturelles. — L'utilisation des chutes d'eau ne sera jamais qu'un cas particulier, et on se fait en général beaucoup d'illusions sur l'économie qu'il peut y avoir à les exploiter. Remarquons d'abord que dans bien des cas, les chutes d'eau ne valent pas la peine d'être exploitées à cause des frais nécessités au bief d'amont et de ceux qu'exige la conduite des eaux à l'usine; outre cela le débit peut être très variable, la

rivière peut geler en hiver et le débit diminuer alors d'une manière considérable. En règle générale les chutes d'eau se trouvent à une certaine distance des centres à alimenter, et enfin n'oublions pas de dire que l'on paiera une redevance plus ou moins considérable à l'Etat, ainsi qu'à la commune sur le territoire de laquelle la chute d'eau existe. Toutes ces conditions réunies font qu'il ne faut pas partir de ce principe que dans tous les cas, il y a avantage à utiliser les chutes d'eau existantes ; il faut au contraire se demander, s'il vaut la peine de les utiliser.

Nous avons dit que, sauf quelques cas particuliers, les ports de mer par exemple, ou encore celui des fabriques importantes à proximité de la chute d'eau, il n'y avait pas lieu d'établir de stations spéciales de distribution de force ; il faut donc utiliser les chutes d'eau pour faire de l'éclairage électrique, et du transport de force comme accessoire.

Nous avons jusqu'à présent utilisé une tension de 3000 volts ; mais pour le transport à longue distance cette tension est trop faible. Les courants alternatifs seuls permettent d'atteindre, sans danger pour les ouvriers, des tensions élevées. Ainsi, nous pourrions marcher avec des alternateurs de 3000 volts ; à la sortie de l'usine où commence la ligne aérienne des transformateurs porteront le voltage à 10, 15, 20 mille volts ; au bout de la ligne aérienne d'autres transformateurs retransformeront le voltage en une tension facilement utilisable. De cette manière on pourra transporter la force aussi loin qu'il y aura économie à le faire, c'est-à-dire tant que le prix de revient de l'unité d'électricité fournie par une telle installation, sera inférieur au prix qu'on obtiendrait en installant une usine à vapeur dans la ville qu'il s'agit d'éclairer.

M. de Weydlich, *Président*. — Vu l'heure avancée, je crois qu'il convient de remettre à la séance prochaine la discussion de la communication de M. Bayet. — Adopté.

M. Roosen. — M. Frenay étant empêché d'assister à la séance, j'exposerai en son nom une note sur :

Commutateur d'essai avec parafoudre et mise à la terre.

Lorsque des fils téléphoniques aériens sont introduits dans une station centrale, on a soin généralement de les relier, avant tout, à un parafoudre, dans le but de protéger, contre les atteintes de l'électricité atmosphérique, les appareils et le personnel de cette station.

Les modèles de paratonnerres en usage dans les installations téléphoniques sont fort nombreux ; quant à leur emplacement, il varie d'après les caprices des constructeurs : les uns, les adaptent sur les appareils à préserver, d'autres les groupent dans un local spécial, d'autres encore les installent à l'extérieur. Ce qu'il importe surtout de rechercher, c'est la facilité d'accès et le bon éclairage, ces conditions étant indispensables à un bon entretien, et, dans le cas de paratonnerres à pointes, à un réglage soigné.

Certains constructeurs ne se contentent pas de ce système de protection ; ils cherchent, pour plus de sécurité, à mettre tous les fils en communication avec le sol, au moment où l'orage sévit, dans le voisinage de la station, avec assez d'intensité pour gêner le travail. Plusieurs dispositifs ont été imaginés dans ce but.

Une autre question se pose au téléphoniste, dans l'arrangement des conducteurs : c'est le moyen d'effectuer les essais des lignes, sans être astreint à détacher chaque fois des fils, au risque de produire des bris ou des défauts de contact. Ce problème est résolu par l'emploi de commutateurs spéciaux. Mais l'installation de ces commuta-

teurs, des paratonnerres et des dispositifs de mise à la terre nécessite plusieurs coupures dans les conducteurs et l'on conçoit que toutes ces solutions de continuité sont les sources de nombreux inconvénients.

Dans le but d'éviter ce sectionnement et de faciliter l'installation, la surveillance et l'entretien de tous ces organes accessoires, j'ai cherché à les grouper. C'est dans cet ordre d'idées que j'ai combiné le dispositif représenté en plan dans la fig. 1 et en coupe dans la fig. 2.

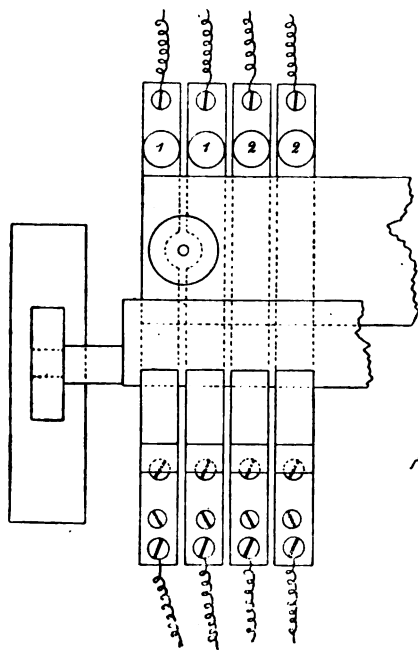


Fig. 1.

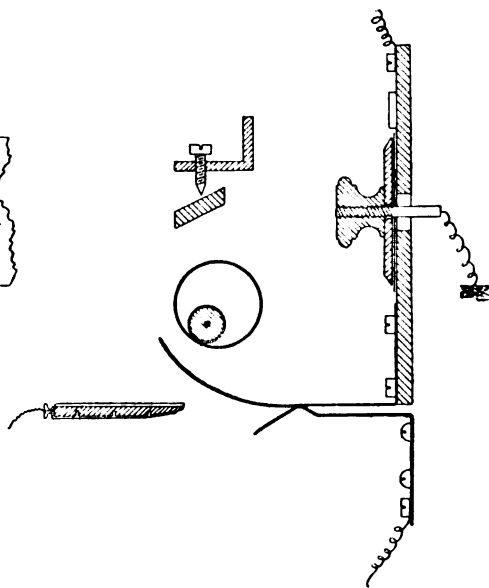


Fig. 2.

Fig. 3.

A la partie supérieure, se trouve un paratonnerre à papier constitué par une bande de cuivre mise en communication avec la terre et serrée, avec interposition de papier paraffiné, sur une série de barreaux en bronze auxquels sont rattachés les fils de ligne.

Ce parafoudre peut être remplacé par un protecteur à pointes représenté à la fig. 3.

L'appareil d'essai comprend deux séries de lames en bronze, formant ressort et pressées l'une contre l'autre. Il suffit, pour les écarter, d'introduire entre elles une broche formée d'une lamelle de cuivre rivée sur monture en os ou en ébonite. Cette broche est raccordée à un poste téléphonique ou à des appareils de mesure, lesquels sont mis en relation soit avec les fils de ligne, soit avec les installations du bureau, suivant qu'on la place dans un sens ou dans l'autre.

La mise sur terre s'obtient par la rotation d'un cylindre tournant excentriquement et qui, par ce mouvement, est amené au contact de toutes les lames supérieures. On peut appliquer une transmission de manœuvre à distance de ce cylindre.

C'est ainsi que j'ai fait l'installation aux bureaux centraux de Bruges et de Tournai, où les appareils placés à l'étage sont manœuvrés avec la plus grande facilité par le personnel du rez-de-chaussée.

Les résultats obtenus jusqu'à présent sont entièrement satisfaisants ; malgré la fréquence de violents orages, aucune avarie n'a été signalée dans les installations de ces deux bureaux.

L'emploi de ce dispositif a été étendu depuis peu à d'autres stations du réseau belge.

MM. Léonard, ingénieur, sous-chef de section à l'Administration des Télégraphes.

Weiler, ingénieur à la Société Electricité et Hydraulique,
Charleroi.

La séance est levée à une heure.

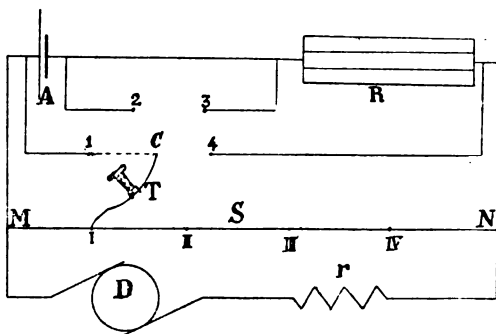
CHRONIQUE

Informations. — Notre camarade M. Henrard, vient de quitter la C^{ie} Popp pour entrer à la C^{ie} Internationale d'Electricité en qualité d'ingénieur. La même Compagnie vient aussi de s'attacher notre camarade M. Janssen, précédemment ingénieur aux usines à cuivre d'Hemixem.

M. Delvaux, membre associé, ayant terminé l'installation de Ninove, vient de rentrer à Bruxelles, où il reste attaché à la Société Tudor.

Notre camarade, M. Centurione a quitté la C^{ie} Ganz, à Buda-Pest, pour prendre la direction de la station centrale d'électricité, à Turin.

Mesure directe de la résistance d'un accumulateur pendant la charge et la décharge, et de la résistance d'un arc voltaïque, par M. BOCCALI, assistant du laboratoire de recherches électro-techniques, à Munich. (Extrait de *l'Electro technische Zeitschrift* de Berlin, 30 janvier 1891).



1° *Accumulateur en charge.* — M. Boccali emploie le dispositif ci dessus, basé sur la théorie du pont de Wheatstone, et tout-à-fait analogue à celui qu'ont adopté Kohlrausch et Less pour la mesure de la résistance des piles, si ce n'est que dans la diagonale M D N, on remplace la bobine d'induction par la dynamo D pourvue d'une résistance de réglage r . L'autre diagonale, qui comprend un téléphone T, est en contact, d'une part, avec le curseur du rhéostat M N formé d'un fil de nickeline de 1 mètre de longueur et de 0^{mm},5 de diamètre; d'autre part, avec l'un des quatre godets à mercure 1, 2, 3, 4 communiquant avec les bornes de l'accumulateur A et avec celles d'une résistance à grille R très-petite et à peu près égale à la résistance A de l'accumulateur.

Les pulsations du courant, provenant de ce que le nombre des lames du collecteur de la dynamo est limité, produisent dans le téléphone un bourdonnement qui devient minimum, avec changement subit de timbre, quand l'équilibre du pont est établi. En mettant successivement C en communication avec les godets 1, 2, 3 et 4, on obtient pour le curseur les positions d'équilibre I, II, III et IV; et l'on trouve aisément que le rapport des résistances A et R est égal au rapport des segments I II et III IV.

2° *Accumulateur en décharge.* — On remplace simplement la dynamo D par un interrupteur à rotation très-rapide; la résistance r est très-grande par rapport à la résistance du rhéostat, afin que les pulsations du courant ne produisent d'effet appréciable que sur le téléphone.

3° *Arc alimenté par une dynamo.* — Le dispositif est le même que dans le premier cas; l'accumulateur est remplacé par l'arc. La résistance R est constituée par un fil de nickeline sans self-induction. Le rhéostat a une résistance très-grande, de 1000 à 4000 ohms; il consiste en une solution de sulfate de cuivre contenue dans une auge à section en V.

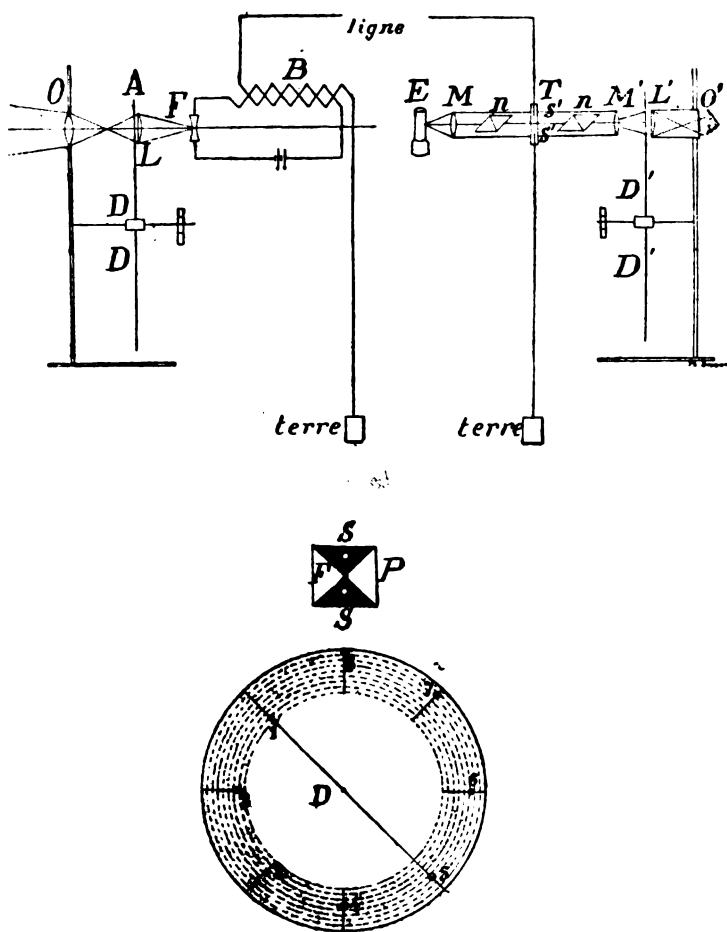
4° *Arc alimenté par une batterie d'accumulateurs.* — Le dispositif est analogue au précédent : la batterie remplace la dynamo. Les pulsations du courant sont produites par un interrupteur à rotation très-rapide, placé en dérivation sur la diagonale M D N, à la suite d'une résistance très-grande, pour les mêmes raisons que dans le second cas.

COLARD.

Le problème de la vision à distance (téléphonie) d'après M. Henri Sutton. (Extrait de la *Lumière Electrique*, décembre 1890.) — La solution du problème de l'audition à distance a atteint actuellement un degré de perfectionnement tellement satisfaisant qu'on trouverait presque naturel d'y joindre, comme un agréable complément, la vision à distance. Cette question cependant n'a encore rien perdu de son caractère absolument hypothétique ; les inventeurs qui l'ont abordée, étaient pour la plupart plus audacieux que savants. Nous exposerons brièvement le dispositif imaginé par M. Henri Sutton et représenté schématiquement par la figure ci-après.

Le transmetteur. — Un objectif photographique O produit une image en A ; dans le plan de l'image est placé un disque léger en métal D D qui tourne à une vitesse que l'on maintient rigoureusement constante au moyen d'une roue phonique Lacour et d'un diapason (comme dans le télégraphe multiple de Delany). Le disque est perforé d'une série de trous 1, 2, 3, 4, 5..... disposés en spirales sur des cercles concentriques ; ces trous doivent être en grand nombre et chacun cependant doit être seul à son tour dans le champ de l'image A.

Une lentille L, placée derrière le disque D D, reçoit sur sa face plane tous les rayons qui lui parviennent



au travers des trous du disque et fait converger successivement ces rayons en son foyer F. En cet endroit est placée une plaque d'un isolant quelconque P, sur laquelle sont collées deux feuilles métalliques SS en forme de triangles, séparées l'une de l'autre par un intervalle dans lequel se trouve en F un peu de noir de fumée ou de

sélénium, dont la résistance électrique varie avec l'intensité des rayons lumineux reçus. Les feuilles métalliques SS sont intercalées dans le circuit primaire d'une bobine d'induction B, dont le circuit secondaire est relié à la ligne (comme dans un microphone).

Grâce à ce dispositif, tous les points de l'image agissent successivement sur F et font varier, suivant les différences de leur éclaircissement, la résistance et par conséquent le courant du circuit primaire.

Ainsi se trouve résolu le problème de la traduction d'une image plane en une suite de courants d'intensités variables. Il s'agit maintenant de faire la transformation inverse.

Le récepteur. — Un rayon lumineux fourni par la source E, après avoir traversé la lentille M, deux prismes de Nicol nn et la lentille M', est reçu par un disque perforé D'D' absolument semblable à celui du transmetteur et tournant synchroniquement avec celui-ci. Deux électrodes S'S' intercalés dans le circuit de la ligne aboutissent à un tube transparent T contenant du sulfure de carbone et placé entre les deux prismes de Nicol nn . L'effet électrostatique produit sur le sulfure de carbone, sous l'action des courants induits dans la ligne par le transmetteur, fait tourner d'une quantité variable le rayon polarisé qui traverse l'appareil et, par suite, une quantité variable de lumière arrivera au disque D'D' en un point absolument symétrique de celui de l'image primitive ; grâce au synchronisme des mouvements des disques, le rayon passera par un trou correspondant puis, après avoir traversé la lentille L' sera reçu par l'oculaire.

Si le mouvement des disques perforés est suffisamment rapide pour amener, en moins d'un dixième de seconde, au point F, les rayons provenant successivement de tous les points de l'image, la persistance de la vision donnera l'impression d'une image unique à l'arrivée.

On résoudrait ainsi, en principe, le problème de la vision à distance ou de la téléphanie, comme l'appelle M. Henri Sutton ; pour réaliser cette idée, il reste à étudier quantitativement les effets des phénomènes physiques utilisés.

T. DE W.

SÉANCE DU 22 FÉVRIER 1891.

Présidence de M. de Weydlich, Président

Ont signé la liste de présence MM. Andringa. Bayet, Broad, Colard, Dawson, De Bast, Demarteau, Discry, Durand, Farman, Francken, Frenay, Eric Gerard, Grottendieck, Hauman, Henrard, Janssen, Keiffenheim, L'Hoest, Libert, Mélotte, Minsier, Nagtglas-Versteeg, Piérard, de Ryckere, de Weydlich.

Le procès-verbal de la séance du 25 Janvier, communiqué en épreuves à l'Assemblée, est approuvé sans observation.

Le Secrétaire général dépose sur le bureau les publications échangées avec le bulletin de l'Association.

M. Dawson, secrétaire, ayant bien voulu se charger du service de la bibliothèque, MM. les membres de l'Association, qui seraient désireux de consulter les ouvrages envoyés à l'Association, sont priés de s'adresser à lui à cette fin (1).

L'assemblée aborde ensuite son ordre du jour, dont le premier article est la communication de M. le Professeur Eric Gerard, sur la graduation des électromètres.

En prenant la parole M. **Eric Gerard** félicite l'Association du succès obtenu par les communications de ses membres qui presque toutes sont actuellement reproduites

(1) Les publications périodiques que l'Association reçoit actuellement sont les suivantes :

La Lumière électrique ; Electricité ; L'Electricien, revue internationale d'électricité ; *Bulletin de la Société belge d'électriciens ; Annales télégraphiques ; Journal télégraphique ; The electrical Review ; The Electrician ; Proceedings of the Institution of electrical engineers ; Electrotechnische Zeitschrift ; Publications de la Société française de physique ; Publication de l'Association des Ingénieurs sortis de l'école de Liège ; Bulletin de l'Elektrotechnischer-Verein, de Vienne ; Bulletin de la Société internationale des Electriciens.*

par les journaux techniques. C'est là un encouragement pour le présent et un gage de succès pour l'avenir. Il est heureux d'annoncer que M. le Ministre de l'intérieur et de l'instruction publique vient de mettre les magnifiques locaux de l'ancienne Ecole normale des Humanités à la disposition de l'Institut électro-technique et que M. le sénateur Montefiore, par une munificence, dépassant encore celle qui a permis de créer l'Institut qui porte son nom, a voulu doter les locaux à approprier d'un matériel en rapport avec les progrès accomplis dans la science et dans les applications électriques.

M. Gerard expose ensuite la note intitulée :

Un auxiliaire des électromètres.

L'usage des électromètres commence à se répandre dans l'industrie pour la mesure des tensions élevées, auxquelles on recourt de plus en plus dans les distributions électriques. Pendant longtemps les électromètres sont restés l'apanage des laboratoires de recherches et quelques électriciens ont même gardé une certaine prévention contre ces appareils qui mettent en jeu des attractions électriques minimes et doivent par suite être d'une construction délicate, lorsqu'ils servent à mesurer de faibles différences de potentiel. Mais lorsque les tensions à mesurer sont élevées, l'électromètre peut recevoir des proportions plus robustes et il a l'avantage de permettre aussi bien la mesure des différences de potentiel alternatives que des tensions continues.

Les voltmètres électromagnétiques au contraire, qui sont d'un emploi commode pour la détermination des différences de potentiel faibles, donnent lieu à des difficultés de construction et de maniement lorsqu'on a affaire à des tensions élevées et particulièrement à des tensions alternatives.

On arriverait à étendre davantage l'usage des électromètres si l'on parvenait à y joindre un appareil qui aurait

pour fonction de modifier dans de larges proportions la sensibilité de ces instruments, leur *range*, pour employer l'expression anglaise ; un appareil qui remplirait à la fois le rôle de shunt et de l'aimant directeur mobile du galvanomètre Thomson.

Nous avons pensé que la machine rhéostatique de Planté pouvait être appelée à cette destination (1). On se souvient que cet appareil, dont le regretté savant français s'est servi particulièrement pour obtenir, à l'aide des piles, des effets de tension comparables à ceux des bobines de Ruhmkorff et des machines électro-statiques, se compose de condensateurs plans qui, à l'aide d'un commutateur, se groupent successivement en surface et en cascade. Si l'on charge la batterie en surface à l'aide d'une pile, puis si on associe les conducteurs en cascade, les polarisations existant dans les diélectriques de ceux-ci s'ajoutent pour donner aux extrémités de la chaîne une différence de potentiel égale à la différence de potentiel initiale multipliée par le nombre de condensateurs. Ce résultat exige toutefois que les charges électriques de ces derniers soient restées intactes pendant la commutation, ce qui est le cas lorsque la capacité des fils de connexion au commutateur et des plots de celui-ci sont négligeables devant la capacité des armatures.

Inversement, si l'on charge la batterie en cascade et si on opère ensuite le groupement en surface, la différence de potentiel initiale est divisée par le nombre de condensateurs, dans l'hypothèse où ceux-ci ont même capacité.

Pour le but que nous avons en vue, il y aurait lieu d'apporter quelques modifications de construction à la machine rhéostatique originale, particulièrement en vue d'assurer un meilleur isolement des pièces métalliques qui la composent. Ainsi les condensateurs à lames de mica construits avec autant de régularité que possible pourraient

(1) *Gaston Planté*. Recherches sur l'électricité — Paris — 1883 p. 251

être enfermés dans une cage en verre pourvue de matières desséchantes, afin d'éviter les déperditions d'électricité. Dans la construction du commutateur, il conviendrait d'éviter le contact des frotteurs en relation avec les armatures et de l'ébonite qui isole les plots tournants, car l'électricité développée par le frottement peut modifier les charges des condensateurs. On aura soin dans le même ordre d'idées de n'employer que des frotteurs et des plots de même métal.

Ces points étant compris, supposons que l'on se donne un électromètre à réflexion de sensibilité moyenne, permettant de mesurer exactement par la méthode idios-tatique, une différence de potentiel d'une centaine de volts.

La première question qui se pose est la graduation de l'électromètre. La machine rhéostatique permet d'éviter l'emploi d'un grand nombre d'éléments étalons, attendu qu'un seul élément chargeant en surface une machine de 80 à 100 condensateurs, donne la différence de potentiel exigée lorsque l'on réunit ceux-ci en cascade. En faisant varier le nombre de condensateurs on obtiendra des différences de potentiel décroissantes.

Pour éviter l'influence des déperditions d'électricité on fera tourner le commutateur de la machine jusqu'à ce que l'aiguille de l'électromètre prenne sa déviation maxima.

L'usage de la machine rhéostatique pour la graduation serait plus utile encore si l'électromètre devait mesurer des potentiels très élevés, 1000 à 10000 volts, car alors les méthodes de graduation habituelles seraient d'une application difficile. Dans un cas semblable on se servirait d'un étalon intermédiaire formé par une pile simple du genre Volta d'une centaine d'éléments, qui serait comparée elle-même avec un élément étalon, à l'aide de la machine.

Une différence de potentiel continue de 10000 volts peut se déterminer directement avec l'électromètre de sensibilité moyenne considéré plus haut, si l'on a soin de

réduire la tension à 100 volts en passant de la charge en cascade à la décharge en surface. Mais si l'on avait affaire à une différence de potentiel alternative, on serait obligé de faire tourner le commutateur de la machine par un moteur alternatif synchronique ce qui serait peu pratique, et il faudrait recourir à un électromètre approprié et gradué avec un étalon intermédiaire comme on l'a dit plus haut.

Enfin, la machine rhéostatique peut être employée au lieu du replenisher de Thomson pour charger l'aiguille d'un électromètre de sensibilité moyenne à un haut potentiel et permettre de mesurer à l'aide d'un tel instrument des différences de potentiel faibles par la méthode hétérostatique.

Dans le cas où, par suite d'une mauvaise construction de la machine, le rapport d'amplification des potentiels ne serait pas égal au nombre des condensateurs, ce rapport pourrait être déterminé une fois pour toutes par une expérience préalable.

En résumé la combinaison d'un électromètre de sensibilité moyenne et d'une machine rhéostatique permet :

1° de graduer l'instrument avec un étalon à faible tension en employant la machine comme *multiplicateur* ;

2° de mesurer de faibles différences de potentiel soit par le procédé idiostatique, soit par la méthode hétérostatique, la machine servant dans ce dernier cas de *rechargeur* ;

3° de mesurer des tensions continues très-élevées, la machine faisant fonction de *réducteur*.

M. de Weydlich, *Président*, exprime à M. Eric Gerard les remerciements de l'Assemblée pour sa communication le sujet qui vient d'être traité intéresse tous les électriciens qui s'occupent du transport électrique de l'énergie à haut potentiel et la solution présentée comble une lacune regrettable dans la collection de nos appareils de mesure.

M. Piérard fait ensuite la communication suivante :

**La Téléphonie le long des chemins de fer
vicinaux belges.**

Depuis quelques années, les chemins de fer à petite section ont pris un grand développement dans notre pays. La « Société Nationale des chemins de fer vicinaux », concessionnaire de leur presque totalité, et dont les premières lignes furent ouvertes au service en juillet et août 1885, possédait déjà, à la fin de 1889, 30 lignes en activité, comportant un développement de 621 km. 9.

L'exploitation rationnelle et économique d'une voie ferrée exige que des communications rapides puissent être échangées entre les diverses stations. Dans les grandes lignes de chemin de fer, on a établi le télégraphe. Mais celui-ci requiert des installations dispendieuses et un personnel spécial ; on ne pouvait l'adopter pour des lignes à faible trafic, ne desservant que des localités peu importantes, où les stations ne sont que de simples haltes, en face d'estaminets dont le tenancier doit assurer à lui seul le service de l'échange des marchandises. Il fallait quelque chose de plus simple, de plus expéditif que le télégraphe, d'un fonctionnement sûr et néanmoins à la portée des campagnards peu instruits appelés à en faire usage : le téléphone seul répondait à ces exigences.

Aussi, lorsqu'en 1885 l'Administration des Télégraphes fut consultée par la « Société Nationale des chemins de fer vicinaux », relativement à l'établissement de communications électriques le long de ses voies, émit-elle l'avis qu'il fallait recourir au téléphone.

Une convention intervint entre les deux Administrations, en vertu de laquelle l'Etat s'engageait à construire et entretenir des lignes et installations téléphoniques à l'usage des Vicinaux, aux conditions d'un tarif déterminé.

C'est ainsi que pour chaque kilomètre de fil aérien la redevance est de 20 francs dans le cas d'un seul conducteur et de 15 francs par fil dans le cas de plusieurs conducteurs sur les mêmes appuis; de 28 francs pour un poste téléphoniques normal comprenant un transmetteur microphonique, une petite machine magnéto-électrique, une sonnerie électro-magnétique, une planchette avec pupitre et caisse à pile, deux téléphones récepteurs avec cordon et un élément de pile.

Si l'on compare ces prix à ceux fixés pour les réseaux, où l'abonnement d'un poste téléphonique dépasse toujours (et souvent largement) 125 francs, on peut juger des conditions avantageuses faites à la « Société Nationale des chemins de fer vicinaux ». Le privilège dont elle jouit est d'ailleurs légitimé par ce fait que l'Etat entre pour 1/3 environ dans la formation du capital de ses voies ferrées et, d'autre part, qu'il avait affaire à un service public naissant, appelé à acquérir une grande importance par la suite, auquel il fallait venir en aide autant que possible.

. . .

C'est en Belgique, pensons-nous, que le téléphone fut pour la première fois appliqué systématiquement le long des voies ferrées, à l'usage exclusif des besoins du service de celles-ci. Aussi mon collègue et ami, M. Frenay, chargé tout d'abord de l'établissement de ces réseaux, se trouva-t-il en présence d'un problème nouveau à résoudre et qui ne laissait pas de présenter certaines difficultés.

Quel dispositif convenait-il d'employer? Fallait-il relier tous les postes par conducteurs spéciaux au bureau tête de ligne, devenant ainsi un petit bureau central; ou pouvait-on brancher tous les postes sur le même circuit soit en dérivation soit en série?

La première solution exigeait un développement considérable de fil conducteur; en outre, elle présentait le grand inconvénient que deux postes quelconques devaient requé-

rir l'intervention d'un bureau auxiliaire pour communiquer entre eux. Un faible coût et une grande rapidité dans la mise en communication étant deux conditions fondamentales, cette première solution était à rejeter.

Restait le montage des postes dans le même circuit.

Celui par dérivation (dans lequel tous les postes viennent se brancher entre deux fils de ligne, ou entre le fil de ligne et la terre dans le cas du circuit à un conducteur), aurait exigé des modifications assez notables aux appareils existants. Dans une grande administration comme celle des télégraphes, où l'on emploie une quantité d'appareils fort différents que le personnel ouvrier doit bien connaître, il importe de réduire le plus possible le nombre de types. Le montage en série ou par embrochage permettant d'utiliser les appareils existants se recommandait donc tout spécialement; c'est celui qui fut adopté.

Restait à savoir dans quelles limites on pouvait l'appliquer. Dans ce système, tout courant lancé dans le circuit traverse successivement tous les postes. Ceux-ci, de par les armatures polarisées de leurs sonneries électromagnétiques, présentent une grande résistance au passage des courants téléphoniques qui sont essentiellement variables et à alternances extrêmement rapides. Chaque fois qu'on intercale un nouveau poste, l'impédance augmente, l'intensité diminue et la transmission téléphonique se trouve donc affaiblie.

A quel nombre de postes devrait-on s'arrêter pour maintenir une communication satisfaisante? C'est ce que la pratique seule pouvait décider. Disons dès maintenant que 12 postes ont pu être embrochés dans le même circuit sans rendre la réception téléphonique trop précaire.

Dans le cas de circuits fortement chargés, celle-ci est d'autant moins bonne, qu'on s'approche davantage des extrémités. Les postes intermédiaires communiquent entre eux dans d'excellentes conditions, ce qui tient à des phénomènes de capacité.

Les stations des chemins de fer vicinaux sont généralement de simples haltes sans bâtiments ou locaux spéciaux. Un café voisin de la halte, constitue la station elle-même, dont le tenancier remplit, dans certaines limites, les fonctions de chef de station. Les postes téléphoniques ont été installés, autant que possible, dans les salles réservées de ces cafés et enfermés dans une boîte munie d'une serrure.

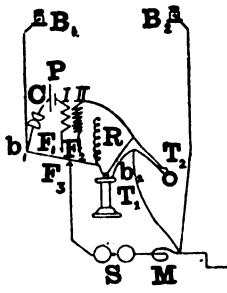


Fig. 1.

Chaque poste comporte: une sonnerie magnéto-électrique S (fig. 1) pour la réception des appels, une machine magnéto-électrique M pour leur production, un microphone De-jongh C, un élément de pile Warnon P, un téléphone récepteur à gaine en ébonite T_1 , un second récepteur du type montre T_2 et une bobine d'induction I, II.

Tous ces appareils sont groupés suivant la disposition bien connue, dont la fig. 1 donne un schéma très-simplifié.

Quand le téléphone T_1 est suspendu au crochet-commutateur-automatique $b_1 b_2$, la sonnerie S seule est en relation avec la ligne, la bobine induite de la machine M étant mise en court-circuit à l'aide d'une disposition mécanique connexe de son système d'entraînement.

Lorsqu'on tourne la manivelle de la machine M, le court-circuit dont il vient d'être question est rompu, et des courants sont émis sur la ligne après avoir traversé la sonnerie S qu'ils actionnent.

Enfin, si l'on dépend le récepteur T_1 du crochet $b_1 b_2$, celui-ci se relève vers le haut sous l'action du ressort R, rompant le contact F_3 et établissant les nouveaux contacts $F_1 F_2$. Le premier ferme le circuit primaire du micro-

phone; le second remplace automatiquement la sonnerie et la magnéto M par le circuit secondaire du microphone, et les deux récepteurs unis en quantité.

Le poste est donc en situation de transmettre et recevoir la parole.

Quant aux signaux des divers postes embrochés dans les circuits vicinaux, nous les avons constitués par des roulements de sonnerie combinés suivant le code Morse, c'est-à-dire par une succession de sonneries brèves et longues alternées. On va du simple au composé. Chaque station est caractérisée par une sonnerie spéciale. Les préposés ne doivent se rendre au téléphone que lorsque c'est leur bureau qu'on appelle. A titre d'exemple, nous donnerons ci-après le tableau des sonneries adoptées sur les lignes suburbaines des « Tramways du Nord d'Anvers ».

Bergen op zoom	_____	Hoevenen	. _____
Hoogerheide	. . . _____	Eeckeren	. _____
Ossendrecht	_____ .	Merxem	_____
Sautvliet		Vieille-Barrière	_____
Beirendrecht	. _____ .	Schooten	_____
Lillo	. _____ .	Brasschaet	_____
Blauwhoef	_____ .	Polygone	_____
Oorderen	_____ . . .	Gooreind	. _____
Wilmaersdonck	. . _____	Wuestwezel	_____ . .
Stabroeck	. . .	Id. douane	. . .

La trop grande complexité des appels ainsi combinés n'est pas à craindre, en raison du nombre relativement élevé de signaux distincts que l'on peut produire au moyen d'une succession cadencée de quelques sonneries.

Ce nombre est précisément égal à celui des arrangements avec répétition que l'on peut faire avec deux lettres

Un point indique une sonnerie brève; une barre une sonnerie prolongée obtenues par exemple la première à l'aide d'un tour de manivelle de la magnéto, la seconde au moyen de deux ou trois tours.

différentes. La formule générale de ces arrangements, facile à trouver, est la suivante :

$$AA_m^n = m^n$$

m étant le nombre de lettres différentes et n le nombre de répétitions. Dans le cas qui nous occupe, les lettres différentes correspondent aux sonneries distinctes (sonnerie brève et sonnerie longue). Elles sont au nombre de 2.

En ne permettant qu'une répétition, le nombre de signaux sera $2^1 = 2$, et les signaux sont en effet constitués dans ce cas par une sonnerie brève et une sonnerie longue.

Avec 2 répétitions, le nombre devient $2^2 = 4$. Les signaux sont alors les suivants : 2 sonneries brèves, 2 sonneries longues, une brève suivie d'une longue et une longue suivie d'une brève. Il faut y ajouter les signaux produits avec une répétition soit 2 en tout 6.

Avec 3 répétitions nous arrivons au nombre $2^1 + 2^2 + 2^3 = 14$ et avec 4 répétitions à 30 ce qui est une limite qu'on ne pourrait atteindre par le montage en série dans l'état actuel des appareils téléphoniques.

Dans le tableau de signaux donné plus haut, on remarquera que certaines stations possèdent le même indicatif. Ce fait provient naturellement de ce qu'elles ne sont pas situées sur les mêmes circuits.

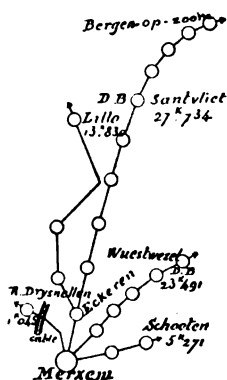


Fig. 2.

Le plan ci-dessous, fig. 2 des diverses lignes qui convergent vers Mershem, poste principal tête des diverses voies ferrées rayonnant 1° vers Anvers, 2° Schooten, 3° Brasschaet-Wuestwezel, 4° Lillo et 5° Santvliet et la Hollande, le montre d'une manière suffisamment claire.

Le circuit réunissant tous les appareils échelonnés le long d'une ligne porte le nom de circuit-omnibus ; dans certains cas, des fils directs reliant les stations principales seulement ont été établis, notamment le long des lignes du littoral,

Ce système est très-avantageux, parce qu'il accélère la transmission, donne un plus grand rendement aux installations et présente plus de sécurité, les deux lignes étant très-rarement dérangées simultanément.

Une objection vient immédiatement à l'esprit : sur les circuits omnibus, tout poste intermédiaire peut écouter les communications échangées. En pratique, cette possibilité de commettre des indiscretions est de nulle importance. Aucun secret d'Etat ne s'échange sur ces fils simplement destinés à la transmission de messages de service sans intérêt pour les tierces personnes, de même d'ailleurs que pour les préposés des stations qu'ils ne concernent pas.

. . .

Aux points de jonction des reliements desservant des lignes appartenant aux mêmes Sociétés, des commutateurs à numéros de types spéciaux ont été installés, à l'élaboration desquels nous avons concouru avec mon collègue Frenay.

Ils sont caractérisés par ce fait que l'appel qu'ils émettent a lieu par sonnerie électro-magnétique, au lieu d'être produit comme dans certaines tables de bureaux centraux ou les petits commutateurs à numéros par sonnerie vibratoire. Ils présentent donc l'avantage de ne pas obliger le préposé à l'appareil de venir relever un volet d'annonciateur, chaque fois que deux postes quelconques s'appellent entre eux sur le même circuit omnibus.

A titre d'exemple, nous décrirons complètement le commutateur de Merxem, dont la vue extérieure est représentée fig. 3. La fig. 4 donne le schéma des organes d'une quelconque des lignes, et le détail d'un jack.

Ce dernier est constitué par cinq lames en maillechort séparées par des plaquettes en ébonite. Deux des lames H G et H₁ G supportent la partie massive G du jack, formant l'embouchure dans laquelle on introduit soit la

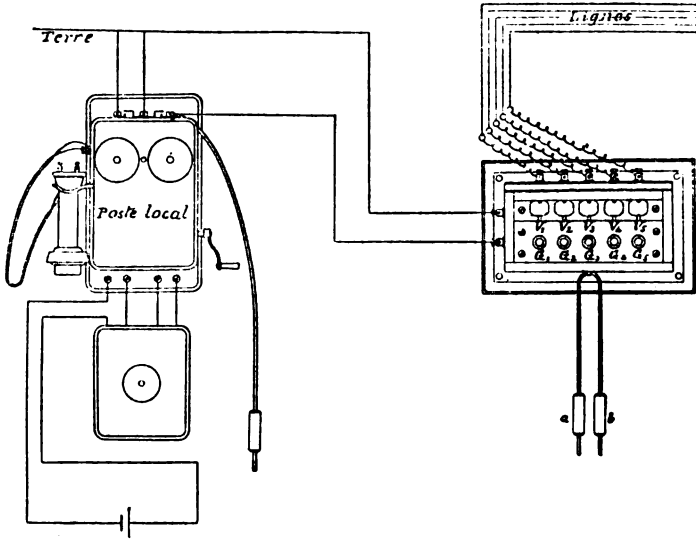


Fig. 3.

fiche du poste, soit l'une des fiches *a*, *b* (fig. 3). Les lames extérieures A B, C D, sont réunies métalliquement entre elles par la goupille A D. Leurs extrémités doublement recourbées B et C, traversent les lames H G, H₁ G par des ouvertures réservées à cet effet et viennent appuyer sur la lame centrale E F.

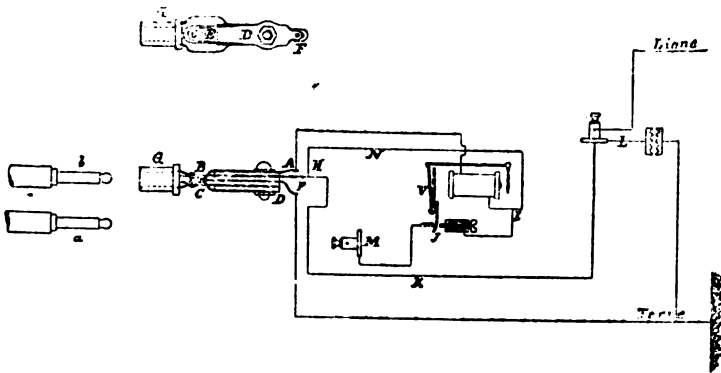


Fig. 4.

Les fiches sont constituées par un cylindre mince de cuivre, recouvert sur une certaine longueur d'une gaine en ébonite servant de poignée et se rattachant à un cordon souple dont l'âme est en cuivre.

En introduisant la fiche reliée au poste local dans un jack, on met la partie métallique en contact avec l'ouverture cylindrique dont la masse G est perforée, tandis que sa pointe arrondie vient écarter les lames A B, C D qui se séparent de la lame centrale E F, laquelle reste isolée.

Cela posé, tout courant lancé sur une ligne arrive à la borne correspondante L où se trouve une dérivation vers le peigne d'un paratonnerre, en H où bifurque une dérivation vers la partie massive G du jack (isolée des autres lames), en N, en I où se rencontre encore une dérivation vers une pointe filetée isolée J, traverse les bobines de l'annonceur, vient en A d'où il se bifurque entre les deux lames A B, C D réunies métalliquement par la goupille A D, comme nous l'avons dit plus haut, revient par la lame centrale E F et aboutit à la terre.

Par son passage dans les bobines de l'annonceur, le courant aimante leurs noyaux en fer doux, d'où déclenchement du volet avertisseur V qui, par sa chute, ferme en J le circuit dérivé vers le poste téléphonique rattaché au commutateur.

A ce moment, les courants d'appel ont donc deux chemins pour se rendre en terre : les bobines d'annonceur d'une part, le poste local d'autre part, dont la sonnerie électro-magnétique se trouve ainsi actionnée.

D'après l'indicatif des signaux d'appel, le préposé au commutateur sait quel est le poste appelé. Si c'est lui dont on requiert l'intervention, il relève le volet V et introduit la fiche de son poste dans le jack de la ligne d'attaque.

L'introduction de cette fiche (représentée à droite du poste) a pour effet, comme nous l'avons vu, d'écarter les deux lames A B, C D, dont le contact avec la lame de terre E F est rompu. En outre, la fiche réunissant la partie

massive dujack aux lames A B, C D, met en court-circuit les bobines de l'annonciateur dont la résistance se trouve ainsi éliminée du circuit, qui comprend dès lors la ligne, la borne L, K, H, la fiche et son cordon souple, le poste local, la terre.

Le préposé peut donc parler avec le poste interpellant. Si la communication avec une autre ligne est demandée, il introduit sa fiche dans le jack de cette ligne. sonne le poste désigné, puis enfonce dans les jacks des deux lignes à connecter les fiches *a* et *b* du cordon à double fiche attaché au commutateur.

Une de ces fiches est entièrement métallique. Elle met en court-circuit les bobines de l'annonciateur correspondant au jack dans lequel on l'enfonce. La seconde est revêtue extérieurement d'une gaine en ébonite dans sa partie cylindrique antérieure, ce qui laisse dans le circuit, l'annonciateur de la seconde ligne.

Les postes en communication ayant terminé, font effectuer quelques tours à la manivelle de leur magnéto, d'où fonctionnement de la sonnerie du poste relié au commutateur, suivant le mécanisme décrit plus haut. (Chute du volet annonciateur de la seconde ligne).

Le préposé est ainsi averti que la communication est terminée ; il enlève les fiches de connexion et relève le volet annonciateur, ce qui rétablit les choses dans leur état primitif.

Les commutateurs pour lignes à double fil fonctionnent d'une manière analogue. Nous ne nous arrêterons pas sur leur description qui nous entraînerait en dehors du cadre de cette note.

Disons seulement que M. Frenay a récemment introduit dans ces appareils les clefs Dewar que l'on emploie dans les grandes tables des bureaux centraux, ce qui simplifie la manœuvre du préposé.

Enfin, j'ai complété les commutateurs à appel par sonnerie électro-magnétique, par l'adjonction d'une sonnerie

vibratoire actionnée par le volet de l'annonceur spécial de fin de communication intercalé en dérivation sur les fils des cordons souples de certaines catégories de ces appareils. On profite ainsi des avantages spéciaux des deux systèmes de sonnerie. L'appel des lignes se transmet par sonnerie électro-magnétique ce qui permet de déceler quel est le poste appelé; et quand deux lignes doivent être déconnectées, la sonnerie vibratoire l'annonce jusqu'à ce que le préposé soit venu relever le volet de l'annonceur de fin de communication.

. . .

Le fil de fer de 3^{mm} employé au début, a rapidement été détrôné par le fil de bronze phosphoreux de 1^{mm},6 à 95 % de conductibilité, grâce auquel les portées normales de 60^m ont pu être régulièrement poussées à 90, 100 et même 120^m. Au point de vue électrique, l'avantage n'est pas moindre, car abstraction faite d'un coefficient de self-induction élevé, le fil de fer de 3^{mm} a une résistance kilométrique de 18^Ω tandis que le fil de bronze de 1^{mm},6 à 95 % n'a dans les mêmes conditions que 8^Ω.46.

Le fil de bronze présente toutefois l'inconvénient d'exercer beaucoup d'affinité pour le givre, qui le recouvre aisément de couches atteignant parfois plusieurs centimètres de diamètre (*). Comme cette surcharge anormale coïncide généralement avec une forte baisse de la température contractant notablement le fil, celui-ci se trouve alors soumis à des tensions excessives qui en déterminent le bris. Aussi est-il probable qu'on sera amené par la suite à employer du fil de bronze à 30 % de conductibilité (d'ailleurs généralement utilisé dans les réseaux belges), lequel est presque deux fois plus résistant, mécaniquement, que celui à 95 %.

(*) Ce fait provient vraisemblablement de la grande conductibilité calorifique du cuivre. En barres de 6^{mm} de diamètre, elle est presque sept fois plus grande que celle du fer.

Après avoir parlé du conducteur, nous sommes naturellement amené à nous occuper de son mode d'attache.

Dans le principe, on se servit des isolateurs ordinaires du télégraphe. Toutefois, on ne fut pas longtemps sans s'apercevoir que ces supports de grande surface et de belle couleur blanche tranchant nettement sur le fond sombre des poteaux, attiraient d'une manière marquée l'attention des personnes malveillantes, attention qui se traduisait par de nombreux bris à l'aide de projectiles pierreux.

Les voies vicinales, fort écartées, peuvent difficilement être l'objet d'une surveillance incessante. Malgré un redoublement de celle-ci de la part non-seulement de la police ordinaire, mais de tous les agents voyers et même de certaines catégories d'employés des chemins de fer vicinaux, stimulés d'ailleurs par l'appât d'une prime, les dégâts devinrent si considérables sur certains reliements, particulièrement aux environs d'Anvers et de Bruxelles, qu'il fallut songer à se prémunir sérieusement contre ces déprédations.

Un remède radical se présentait immédiatement à l'esprit: l'emploi d'isolateurs blindés. Ils sont constitués par un isolateur à simple cloche entièrement recouvert, extérieurement, d'une cloche en fonte malléable galvanisée. Mais ces supports présentent le double inconvénient de coûter fort cher et d'être très pondéreux (poids et prix trois fois plus grands que les isolateurs ordinaires). C'est pourquoi je fus amené à essayer l'emploi d'isolateurs colorés, notamment en brun foncé, au moyen d'un silicate approprié faisant partie de l'émail des cloches. Une ligne nouvelle d'une longueur de 22 km. fut établie en alternant les isolateurs blancs et bruns de poteaux à poteaux, ce qui mettait évidemment leur ensemble dans la même situation au point de vue de la destruction par malveillance. La mise en observation de cette ligne fournit au bout d'un an les résultats suivants: sur 102 isolateurs

de chaque espèce utilisés simultanément, on releva 25 cas de bris d'isolateurs ordinaires contre 13 seulement pour les colorés, l'immunité relative de ces derniers s'étant manifestée dès les premiers jours de leur emploi et d'une manière constante.

Traduit en chiffres, cet essai indiquait qu'une économie de 42 %, non compris la main d'œuvre, pouvait être réalisée sur le coût de remplacement des isolateurs blancs brisés, ce qui engagea le service des télégraphes à poser la règle suivante : Lorsqu'un isolateur blanc sera brisé par malveillance dans une ligne sur chaussée, on le remplacera par un isolateur coloré ; si celui-ci est atteint à son tour, on y substituera un isolateur blindé.

. . .

Les circuits sont autant que possible construits à simple fil. Mais, lorsque la chaussée empruntée par le vicinal est longée par des fils télégraphiques, on recourt au double fil et installe les raccordements téléphoniques sur les poteaux télégraphiques. On se débarrasse complètement des courants d'induction, en faisant passer alternativement les deux brins constituant chaque circuit, de part et d'autre des poteaux, sur des distances déterminées de manière à équilibrer exactement la *f. é. m.* d'induction.

Les figures suivantes 5, 6 et 7, montrent trois dispositifs de ferrures de croisement imaginés par des agents du télégraphe. Le dernier, dû au contre-maître Saboo, est très simple et le moins coûteux, car il ne requiert pas de ferrures spéciales. On le constitue au moyen de 4 isolateurs ordinaires.

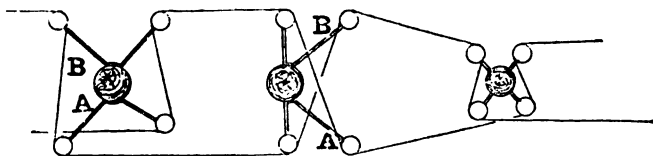


Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.

On remarquera sans doute que le fil ne décrit pas une spirale sur lui-même, les deux brins de chaque circuit étant simplement croisés en projection horizontale.

On peut aisément démontrer que cela suffit pour annuler l'induction d'une manière complète.

Soient, en effet, fig. 8, F_1 , F_2 , les 2 fils d'un circuit téléphonique, distants de longueurs l_1 , l_2 , d'un fil télégraphique F_i tendu parallèlement.

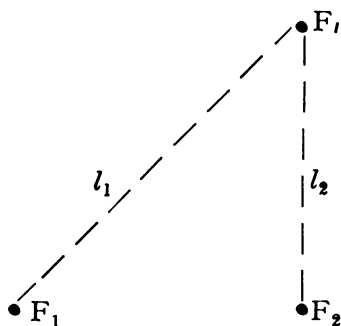


Fig. 8.

tensité du courant inducteur.

$$E_1 = M_1 L \frac{di}{dt}$$

De même dans le fil F_2 :

$$E_2 = M_2 L \frac{di}{dt}$$

Ces *f. é. m.* sont de même sens. La boucle $F_1 F_2$ sera donc parcourue par un courant engendré par la *f. é. m.* résultante :

$$E_1 - E_2 = (M_1 - M_2) L \frac{di}{dt}$$

Mais, si à l'extrémité de la longueur L nous faisons prendre à F_2 la position de F_1 et réciproquement, et que nous prolongions les circuits inducteurs et induits d'une longueur L_1 , le fil F_2 sera soumis dans cette section à une *f. é. m.* :

Pendant sa période variable, le courant télégraphique engendre dans le fil F_1 une *f. é. m.* d'induction proportionnelle à la longueur sur laquelle l'action se produit, au coefficient d'induction mutuelle par unité de longueur des deux fils considérés et à vitesse de variation d'in-

$$E'_2 = M_1 L_1 \frac{di}{dt}; \quad \text{et le fil } F_1 \text{ à}$$

$$E'_1 = M_2 L_1 \frac{di}{dt}.$$

En résumé, le fils F_1 sera le siège d'une *f. é. m.* :

$$E_1 + E'_1 = M_1 L \frac{di}{dt} + M_2 L_1 \frac{di}{dt} = (M_1 L + M_2 L_1) \frac{di}{dt};$$

tandis que le fil F_2 sera soumis à la *f. é. m.* :

$$E_2 + E'_2 = M_2 L \frac{di}{dt} + M_1 L_1 \frac{di}{dt} = (M_2 L + M_1 L_1) \frac{di}{dt}.$$

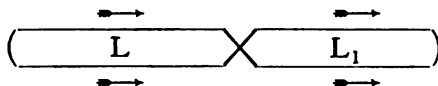


Fig. 9.

Les *f. é. m.* développées dans les 2 fils sont opposées fig. 9 en sorte que le circuit sera le siège d'une *f. é. m.* résultante :

$$E_1 + E'_1 - (E_2 + E'_2) = [M_1 L + M_2 L_1 - (M_2 L + M_1 L_1)] \frac{di}{dt}$$

et l'on voit qu'il suffit, pour l'annuler, que les longueurs L et L_1 soient égales.

Il est toutefois à considérer que le calcul précédent ne s'applique que lorsque le brin du circuit inducteur et les 2 brins du circuit induit sont d'un bout à l'autre dans les mêmes conditions électriques d'isolement, de résistance, de capacité et de self-induction.

L'isolement et la résistance kilométrique seront en temps normal les mêmes, les 2 brins induits étant composés du même fil et leur capacité ne sera pas sensiblement différente, puisqu'ils sont placés à 0^m40 l'un de l'autre et à 8 ou 10^m du sol.

Quant au coefficient de self-induction, on l'équilibre dans

les deux fils induits, en intercalant successivement dans chacun d'eux les postes des circuits omnibus.

Prenons un exemple. Supposons qu'un circuit téléphonique comprenant 4 postes soit longé sur une partie de son parcours par un premier fil télégraphique F_1 et sur tout son parcours par un second fil télégraphique F_2 .

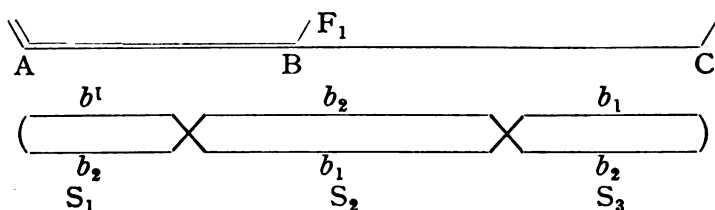


Fig. 10.

En appelant b_1 et b_2 les 2 brins du circuit téléphonique, on voit qu'un croisement au milieu de A B (fig. 10) annulera l'induction du fil F_1 et celle de F_2 sur la portion A B. L'équilibre est donc obtenu jusqu'en ce point, et il suffira d'un second croisement au milieu de la seconde section B C, pour équilibrer le restant de la ligne téléphonique, par rapport à la partie B C du fil F_2 .

En ce qui concerne la distribution des postes, deux de ceux-ci se trouveront naturellement aux extrémités de la boucle, les deux autres seront mis en circuit l'un sur le brin b_1 , l'autre sur le brin b_2 .

La fig. 10 montre que, partant d'une extrémité du circuit téléphonique, il suffit théoriquement d'établir autant de croisements moins un, que l'on rencontre de fils télégraphiques soit isolés, soit en faisceaux, divergeant de la ligne ou prenant terre sur son parcours.

Ainsi, suivant de A en C le circuit téléphonique représenté fig. 10, on trouve un fil divergeant en A, un en B, un troisième en C. Le nombre de croisements strictement nécessaire sera $3 - 1 = 2$, cas de la fig.

Plus simplement, en dénommant sections les parties homogènes (relativement au nombre de fils) du faisceau considéré, il faudra au minimum autant de croisements qu'il y a de sections.

En pratique, et pour obvier aux diverses causes d'hétérogénéité que présentent les fils conducteurs relativement à leurs diverses constantes électriques, il est prudent de multiplier les croisements. Des résultats satisfaisants ont été obtenus en les installant tous les 500 mètres environ.

Comme on le voit par la fig. précédente, le problème de l'annulation de l'induction sur un circuit, revient à celui de l'annulation sur une succession de sections A B, B C, etc... délimitées par l'arrivée, le départ ou la mise sur terre de fils télégraphiques.

Si l'on remarque d'autre part que sur une de ces sections partielles, la facilité du calcul de la position des croisements exige l'emploi d'un nombre impair de ceux-ci, pour les espacer sur des longueurs égales dans chaque section (*), on peut déterminer immédiatement la distance approximative qui les séparera dans chacune de celles-ci.

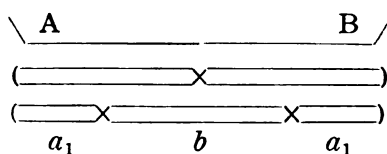


Fig. 11.

(*) Si un circuit télégraphique A B est voisin d'un circuit téléphonique, fig. 11 on peut équilibrer ce dernier notamment des deux manières suivantes ou par le placement d'un croisement au milieu de A B ou par deux croisements situé chacun à $\frac{AB}{4}$ des extrémités A et B. La première solution est évidemment la plus simple, la moins coûteuse et la plus facile à réaliser exactement étant donné que les poteaux sont distribués irrégulièrement.

Si A est la longueur en mètres d'une section: $\frac{A}{500} = a$, nombre de croisements qu'il est bon d'installer. Si a est impair, ce chiffre peut être admis; s'il est pair, on l'augmentera d'une unité. Le nombre des croisements dans la section considérée sera donc alors de $a + 1$ et leur distance moyenne $\frac{A}{a + 1}$.

Cela posé, on déterminera l'endroit précis où ils doivent être fixés, connaissant la distance horizontale des poteaux télégraphiques.

S'il fallait établir un second reliement téléphonique, on considérerait le premier comme formant un faisceau de fils télégraphiques dont les sections à équilibrer seraient celles comprises entre les croisements de ce premier circuit téléphonique.

On aurait évidemment à tenir compte des sections formées par les fils télégraphiques préexistants.

Le nombre des croisements nécessaires est obtenu de la manière suivante: on superpose par la pensée le faisceau télégraphique au premier circuit téléphonique, ce qui donne de nouvelles sections dont le nombre fixe celui des croisements nécessaires pour le second circuit téléphonique. La position de ces derniers est le milieu des sections ainsi délimitées.

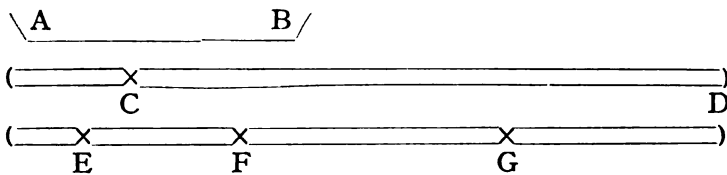


Fig. 12.

Soit par exemple, un fil télégraphique longeant un circuit téléphonique sur une partie de son parcours. Si la longueur $A B$ ne dépasse pas 1000 mètres, le premier circuit téléphonique ne présentera qu'un croisement en C milieu de $A B$.

Le second circuit devra en présenter un en E milieu de A C, un second en F milieu de C B et un troisième en G milieu de B D.

Les sections à équilibrer sont donc A C, C B et B D, résultant de la superposition des circuits préexistant à celui que l'on calcule.

* . *

Afin d'éviter les perturbations dues aux défauts d'isolement causés par le contact des branches d'arbres avec les fils des circuits vicinaux qui longent des routes généralement boisées sur leurs accotements, j'ai fait construire un sécateur à manche démontable permettant d'atteindre les branches jusqu'à la hauteur de 9 mètres. A cet effet, son support se compose de 4 parties de 2 mètres terminées par des bouts en fer se vissant l'un dans l'autre. La lame du sécateur est manœuvrée au moyen d'une forte ficelle; sa partie fixe est en forme de crochet, afin de saisir plus aisément les rameaux à couper.

Pour terminer, il me reste à donner quelques renseignements statistiques relatifs au développement de la téléphonie vicinale en Belgique. Ce développement a été très-rapide, comme l'atteste le tableau suivant arrêté au 31 décembre 1890.

Au 31 décembre	Longueurs kilométriques des voies ferrées desservies	Longueurs kilométriques de			Nombre de postes
		Fils aériens utilisés		Fils en câbles sous-fluviaux	
		FER	BRONZE		
1887	129	233,631	157,453	1,738	44
1888	259,2	257,402	309,316	2,200	82
1889	294	261,277	342,698	2,200	90
1890	412,26	273,672	632,517	2,775	136

Si l'on rapporte le nombre de postes à la longueur totale des lignes desservies, on trouve :

Qu'en 1887 il y avait 1 poste par 2 km. 93 de voies ferrées

» 1888 » 1 » » 3 » 16 » »

» 1889 » 1 » » 3 » 26 » »

» 1890 » 1 » » 3 » 03 » »

Soit très-approximativement un poste tous les 3 kilomètres.

Enfin, au 31 décembre 1890, les circuits à fil simple étaient installés sur 242^{km},3 de voie ferrée, et les circuits à double fil ou métalliques sur 169^{km},96 soit 59 % en fil simple et 41 % en fil double.

* *

M. Eric Gerard. — Le succès constaté par le camarade Piérard dans l'application du téléphone au service des chemins de fer vicinaux me rappelle que, lorsqu'à l'Administration des télégraphes il fut question d'adopter la réception par sounders, j'ai proposé d'ajourner cette mesure que l'application du téléphone rendrait à mon avis inutile par la suite.

Je crois qu'il convient de faire remarquer qu'en principe, il n'est pas nécessaire d'insérer les postes alternativement sur le circuit d'aller et sur celui du retour, car il résulte d'une expérience classique de Faraday que deux conducteurs tordus ensemble ne donnent lieu à aucune force électro-motrice résultante lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique variable, quelles que soient les différences que présentent ces conducteurs au point de vue de la résistance, de la self induction ou de la capacité.

M. Piérard. — Nous avons été amenés à procéder de la sorte par l'expérience de la ligne de Bruxelles à Paris qui, parfaitement équilibrée, cessait de l'être dès qu'on y insérait un simple téléphone récepteur à Quévy.

M. Gerard. — Cela ne pouvait tenir qu'à des dérivations.

M. Frenay. — Le fait cité par M. Piérard est exact; je pense, comme M. Gerard, que la rupture d'équilibre tenait aux dérivations de la ligne.

M. Gerard. — La question de l'installation des postes téléphoniques par embrochage intéresse quelques électriciens parmi lesquels des membres de l'Association. Il serait utile pour eux d'avoir, au sujet de ces lignes, des données permettant de déterminer le nombre de postes susceptibles d'être installés de la sorte, par exemples la self-induction et la résistance des diverses portées du circuit.

MM. Frenay et Piérard n'ont pu, jusqu'aujourd'hui, faire les mesures nécessaires à la détermination de ces données. Ils espèrent pouvoir envoyer très-prochainement à l'Institut électro-technique Montefiore des postes téléphoniques afin qu'on y détermine la self-induction de ces appareils.

M. de Weydlich, *président*, expose ensuite quelques

Considérations sur les méthodes servant à la mesure des constantes des piles. — Dispositif donnant une grande exactitude.

Tous ceux qui ont eu à mesurer les constantes des piles, c'est-à-dire leur force électro-motrice et leur résistance intérieure, ont pu constater combien il est difficile d'obtenir des résultats d'une concordance satisfaisante, non-seulement pour des éléments différents de même genre, mais même en répétant l'essai avec le même élément ou la même batterie d'éléments dans des conditions différentes de fonctionnement.

C'est surtout les mesures des résistances intérieures qui donnent des résultats peu satisfaisants; les mesures des forces électro-motrices sont susceptibles de donner aisément une grande exactitude si l'on se contente de les faire soit en circuits ouvert, soit en mettant dans le circuit des grandes résistances de façon que le courant produit par la pile soit suffisamment faible pour ne pas les altérer d'une manière sensible. Il n'en n'est plus de même pour les

mesures des résistances intérieures; en effet, dans toutes les méthodes généralement employées dans ce cas, on ne pourrait obtenir une bonne approximation qu'à la condition de former le circuit avec des résistances de même ordre de grandeur que celle de la pile étudiée; l'intensité du courant devient alors suffisamment grande pour produire une altération notable de la pile; or, déjà en 1885, M. Preece avait signalé l'influence de l'intensité du courant sur la résistance intérieure des accumulateurs; plus récemment, à la suite des expériences effectuées au Laboratoire central d'électricité à Paris sur des piles de différents modèles, M. Bary a nettement formulé le fait de la diminution de la résistance intérieure des piles lorsque l'intensité du courant qu'elles débitent augmente (dans certains cas cette variation atteignait de 50 à 75 pour cent, lorsque l'intensité du courant variait dans le rapport de 1 à 100).

Ceci indique immédiatement les causes des erreurs que l'on peut reprocher aux méthodes de mesures ordinairement employées — telles que les méthodes de Mance, d'égaux déviations et de déviation réduite. En effet, dans ces méthodes, non-seulement on est obligé de faire donner aux piles des courants beaucoup plus intenses que ceux auxquels elles sont destinées, mais encore l'intensité du courant ne reste pas la même pendant le même essai, car ces méthodes sont précisément basées sur les effets de deux intensités différentes du courant; on conçoit que dans ces conditions, la résistance intérieure de la pile ne restant pas la même pendant les deux observations d'un même essai, on a des résultats indéterminés qui ne peuvent être satisfaisants.

Pour tenir compte du fait signalé par M. Bary il est donc indispensable, pour obtenir des résultats déterminés et comparables, de spécifier l'intensité du courant fourni par la pile étudiée et ce courant ne doit pas varier pendant l'essai. Si la pile est destinée à fonctionner sur un circuit

invariable, le mesure de sa résistance intérieure devra être effectuée de façon que le courant soit égal à celui qu'elle aura à débiter normalement; si l'on tient à se rendre compte du fonctionnement de la pile dans différentes conditions, il faudra effectuer une série de mesures en assignant à l'intensité du courant des valeurs variables dans des limites aussi larges que possible.

La méthode qui convient le mieux aux essais de ce genre est la méthode des potentiels ou du potentiomètre qui consiste, comme on sait, à mesurer le rapport de la *f. é. m.* en circuit ouvert à la différence des potentiels aux bornes de la pile lorsqu'elle est mise en circuit avec une résistance connue. On peut se servir pour cela soit d'un électromètre, soit d'un galvanomètre balistique avec un condensateur, soit enfin d'un voltmètre de très-grande résistance ou d'un galvanomètre ordinaire à la suite

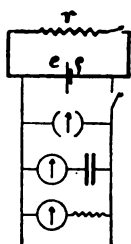


Fig 1.

duquel on intercale une résistance très-grande. Le schéma du dispositif est représenté par la fig. I. Si les déviations α_0 et α de l'appareil employé sont respectivement proportionnelles à la *f. é. m.* et à la différence de potentiel aux bornes de la pile lorsque celle-ci est fermée sur une résistance extérieure r , la résistance intérieure ρ se calculera d'après l'expression

$$\rho = \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha} r$$

La *f. é. m.* de la pile étant connue, l'intensité du courant qu'elle débite est immédiatement calculable et ne change pas pendant le même essai; en outre, cette méthode permet de mesurer d'une manière très-commode les variations de la résistance intérieure, lorsqu'on assigne à l'intensité du courant des valeurs différentes en variant la résistance r .

Cette méthode, cependant, n'est pas exempte de l'inconvénient, déjà mentionné à propos des autres méthodes, de

ne donner une approximation suffisante qu'à condition que la chute de potentiel soit assez grande c'est-à-dire que la pile fournisse un courant beaucoup plus intense que celui auquel elle est généralement destinée. En effet, il est facile de démontrer que l'erreur relative que l'on peut commettre sur la valeur de ρ , par suite des erreurs de lecture commises sur les dérivations α_0 et α , est :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\alpha_0 + \alpha}{\alpha (\alpha_0 - \alpha)} \Delta \alpha,$$

où $\Delta \rho$ et $\Delta \alpha$ désignent respectivement les erreurs absolues possibles. En faisant $\frac{\alpha_0}{\alpha} = n$, on peut également écrire :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{n (n + 1)}{n - 1} \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0}$$

Cette expression passe par un minimum pour $n = 1 + \sqrt{2} = 2,4\dots$, ce qui donne

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 5,8 \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0};$$

on ne s'écarte guère de cette valeur tant que α est compris entre $\frac{\alpha_0}{2}$ et $\frac{\alpha_0}{3}$ ce qui correspond à une valeur de r comprise entre ρ et $\frac{\rho}{2}$.

Dans ces conditions l'erreur relative sur ρ est égale à six fois l'erreur relative possible sur la plus grande déviation; or, cette dernière erreur est rarement inférieure à $\frac{1}{300}$ dans les mesures courantes de laboratoire; on ne saurait donc garantir l'exactitude de la valeur de ρ obtenue par cette méthode à moins de 0,02 près dans les conditions les plus favorables. Cette exactitude devient bien plus faible lorsqu'on fait travailler la pile dans les conditions normales de son emploi, qui correspondent ordinairement à une valeur de r environ 100 fois plus grande que ρ ; en effet, en prenant $\frac{r}{\rho} = 100$, ou $n = \frac{\alpha_0}{\alpha} = \frac{101}{100}$, il est facile de vérifier par la formule ci-dessus que l'erreur

relative sur la valeur de ρ peut atteindre dans ce cas 0,67, ce qui n'est plus du tout admissible.

Pour améliorer l'exactitude, on pourrait effectuer les essais en prenant une grande batterie d'éléments en nombre impair que l'on réunirait en opposition de façon à introduire dans le circuit la *f. é. m.* d'un seul élément et la résistance de tous les éléments, mais, ce procédé n'est pas recommandable, car les deux groupes d'éléments ne seraient pas dans les mêmes conditions de fonctionnement; en effet, le groupe le plus faible, non-seulement ne donnerait pas de courant, mais serait traversé par un courant inverse.

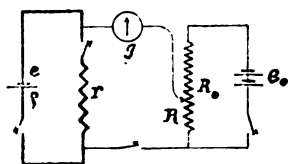


Fig. 2.

J'ai cherché à remédier au manque d'exactitude de cette méthode en la combinant avec celle de Poggendorff pour en faire une méthode de réduction à zéro. A cet effet, je forme le circuit dont le schéma est montré par la figure II.

La pile auxiliaire e_0 doit avoir une *f. é. m.* au moins égale à celle de la pile étudiée e avec laquelle elle est mise en opposition. La résistance R_0 , sur laquelle travaille la pile auxiliaire, est fixe; elle doit être suffisamment grande pour que le courant fourni par la pile e_0 reste absolument constant et pour qu'on puisse parfaitement négliger dans les calculs la résistance intérieure de cette pile; on fera donc $R_0 = 1000\omega$ au moins. Le courant dans le galvanomètre est annulé en variant la résistance R , sur laquelle on prend la dérivation, tout en laissant à R_0 sa valeur (on réalise ceci très-aisément avec deux caisses de résistances, en bouchant dans l'une d'elles ce qu'on a débouché dans l'autre).

Lorsque la déviation du galvanomètre est annulée, les différences de potentiel aux extrémités des résistances r et R sont égales et l'on peut écrire par conséquent:

$$e \frac{r}{r + \rho} = e_0 \frac{R}{R_0}, \text{ d'où } \rho = r \left(\frac{e R_0}{e_0 R} - 1 \right)$$

Le rapport $\frac{e}{e_0}$ est déterminé préalablement en faisant $r = \infty$, ce qui donne $\frac{e}{e_0} = \frac{R'}{R_0}$ avec une approximation très-grande.

Pour évaluer l'exactitude avec laquelle on peut déterminer la valeur de ρ par cette méthode, prenons l'expression de l'intensité du courant dans le galvanomètre lorsque l'équilibre n'est pas atteint. L'application des lois de Kirchhoff nous donne :

$$i = \frac{e r R_0 - e_0 R (r + \rho)}{g R_0 (r + \rho) + R (R_0 - R) (r + \rho) + r \rho R_0} = \frac{\alpha}{K}$$

où α désigne la déviation correspondante au courant i et K la constante du galvanomètre ou la déviation par unité de courant. En appelant $\Delta \alpha$ et $\Delta \rho$ les erreurs absolues, on a, en substituant à ρ , $\rho + \Delta \rho$ dans le numérateur seulement :

$$\frac{(\alpha + \Delta \alpha) - \alpha}{K} = \frac{e_0 R \Delta \rho}{g R_0 (r + \rho) + R (R_0 - R) (r + \rho) + \rho r R_0}$$

En remplaçant dans cette expression R par sa valeur tirée de la condition $i = 0$, on trouve après quelques réductions :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left(1 + \frac{r}{\rho}\right) \left[g \left(1 + \frac{\rho}{r}\right) + R_0 \frac{e}{e_0} \left(1 - \frac{e}{e_0} \frac{r}{r + \rho}\right) + \rho \right] \frac{\Delta \alpha}{K e}$$

On déduit de cette formule que pour rendre $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ aussi petit que possible, on doit se guider par les considérations suivantes :

1° Si l'on a le choix entre plusieurs galvanomètres, on donnera la préférence à celui pour lequel le rapport $\frac{g}{K}$ est le plus faible.

2° La résistance R_0 doit être aussi faible que possible, mais nous avons vu que, par suite d'autres considérations, on ne doit pas la faire inférieure à 10000 ω .

3° $e_0 = 2 e \frac{r}{r + \rho}$ (pour ne pas avoir à changer la pile

pendant une série d'expériences, on peut prendre $e_0 = 2e$ ce qui correspond au maximum de sensibilité pour $r = \infty$).

4° Enfin, en annulant la dérivée de l'expression ci-dessus par rapport à $\frac{r}{\rho}$, on trouve comme condition du minimum :

$$\frac{r}{\rho} = \sqrt{\frac{g}{g + \frac{e}{e_0}(R_0 - 1) + \rho}}$$

Pour comparer l'exactitude de cette méthode avec celle du potentiomètre, prenons un exemple. Soient : $e = 1^{\circ}$; $e_0 = 2^{\circ}$; $R_0 = 10000\omega$; $g = 500\omega$; $K = 30.10^6$ divisions par ampère (c'est la valeur moyenne que l'on trouve pour les galvanomètres du type Deprez-d'Arsonval construits par les élèves de l'Institut Montefiore).

La valeur du rapport $\frac{r}{\rho}$ qui correspond au minimum d'erreur serait, dans ce cas, d'environ $\frac{1}{3}$, ce qui est une valeur anormale au point de vue du fonctionnement de la pile étudiée; sans nous en préoccuper, donnons à $\frac{r}{\rho}$ les mêmes valeurs que nous avons considérées dans la méthode du potentiomètre c'est-à-dire $\frac{r}{\rho} = 1$ et $\frac{r}{\rho} = 100$.

En substituant dans l'expression de $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, on trouve pour $\frac{r}{\rho} = 1 \dots \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,0003$ et pour $\frac{r}{\rho} = 100 \dots \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,01$, tandis que la méthode de potentiomètre donne dans les mêmes conditions :

pour $\frac{r}{\rho} = 1 \dots \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,02$ et pour $\frac{r}{\rho} = 100 \dots \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,67$

Ces chiffres suffisent pour montrer la supériorité, au point de vue de l'exactitude, de la méthode de réduction à

zéro ; il ne faut cependant pas perdre de vue que dans le calcul de l'erreur exposé ci-dessus, on ne tient compte que des erreurs possibles sur les lectures, en supposant que des précautions suffisantes ont été prises pour éliminer toutes autres causes d'erreurs telles que la polarisation de la pile, les variations de température, etc. A cet effet, en faisant une série de mesures avec la même pile, il est indispensable de vérifier avant chaque modification de la résistance extérieure r si le rapport $\frac{c_0}{e}$ des deux *f. é. m.* en circuit ouvert ne varie pas.

Il n'est pas sans importance, au point de vue de l'étude théorique des piles, de faire remarquer qu'en déterminant la résistance intérieure d'une pile pour différentes intensités de courant, on ne peut affirmer a priori que la *f. é. m.* reste la même en circuit fermé qu'en circuit ouvert et, par conséquent, que les variations que l'on constate ne doivent pas être attribuées uniquement à la résistance intérieure, mais qu'elles sont dûes probablement à l'effet combiné des variations de la résistance intérieure et de la *f. é. m.* en circuit fermé. Pour évaluer la part de cette variation qui revient à chacune de ces deux quantités, il faudrait pouvoir les mesurer séparément pour une même intensité du courant débité par la pile ; ceci ne peut être fait par les méthodes que nous venons d'examiner et, en ce moment, je ne pourrais citer qu'un moyen qui permette de mesurer la résistance intérieure d'une pile indépendamment de sa force électromotrice : c'est l'emploi des courants alternatifs, comme dans la méthode préconisée par Kohlrausch ; malheureusement, cette méthode exige des précautions spéciales pour éviter les causes d'erreurs qui peuvent provenir surtout des effets de self-induction et de capacité électrostatique ; en outre, on ne saurait affirmer, qu'un courant alternatif ne produit pas dans les liquides une modification de leur état moléculaire qui pourrait ne pas être sans influence sur leur résistance électrique.

Sans m'arrêter plus longtemps à ces considérations, je ferai remarquer finalement, qu'au point de vue des appli-

cations, il est parfaitement superflu de chercher à distinguer les deux causes de l'effet accusé par les expériences, car on peut se rendre complètement compte du fonctionnement d'une pile en mesurant simplement la différence de potentiel aux bornes de la pile. Ainsi on peut dans ce cas se borner à dresser soit les courbes des différences de potentiel en fonction du courant (tous les points d'une telle courbe étant relevés soit immédiatement après la fermeture du circuit, soit après une durée de fonctionnement fixe), soit les courbes des différences de potentiel en fonction du temps, la résistance du circuit extérieur restant invariable pour chaque courbe.

Une série de courbes de ce genre caractérise d'une manière complète le fonctionnement d'une pile et l'on pourrait appeler ces courbes, par analogie avec celles que l'on emploie dans l'étude des dynamos, courbes caractéristiques d'une pile.

M. Hauman. — La ville de Bruxelles vient de nommer une Commission chargée d'examiner la question de la réglementation des installations électriques. Ayant été appelé à faire partie de cette Commission en ma qualité d'élève de l'Institut Montefiore, je crois devoir signaler cette circonstance à mes camarades.

M. de Weydlich, Président. — C'est très flatteur pour nous que M. Hauman ait été choisi par la ville de Bruxelles en sa qualité d'élève de l'Institut.

M. Piérard. — La question pourrait être soumise à la discussion, afin que M. Hauman puisse exposer, au sein de la Commission les idées de l'Association à cet égard.

M. L'Hoest. — Je ne vois nul inconvénient à ce que cette discussion ait lieu. Mais il faut remarquer que M. Hauman ayant été appelé à faire partie de la Commission en sa qualité d'élève de l'Institut et non comme délégué de l'Association, il ne peut y être chargé d'un mandat quelconque de notre part.

C'est avec cette réserve que je vous propose d'inscrire la question à l'ordre du jour d'une prochaine séance. — Adopté.

La Séance est levée à une heure et quart.

CHRONIQUE.

A propos de l'hystérésis par M. Chas. Steinmetz, de New-York. (E. T. Z. de Berlin, 6 février 1891).— Dans sa note, l'auteur considère les résultats d'expérience déjà obtenus, et il en tire une formule empirique très simple.

Les corps magnétiques, placés dans des champs magnétiques changeant périodiquement de sens, tels que ceux qui sont produits dans une bobine traversée par des courants alternatifs, parcourent des cycles magnétiques fermés dont l'aire représente la perte d'énergie par hystérésis. Ewing et d'autres ont fait de nombreuses expériences à ce sujet, mais la loi du phénomène restait inconnue.

M. Steinmetz a considéré les résultats obtenus par Ewing et publiés (Kittler, traité d'Electro-technique, tome 2, page 252) en un tableau qui se trouve reproduit ci-joint : tableau I, colonnes 1, 2 et 3. f représente la force magnéto-motrice en unités C. G. S ; B , l'induction magnétique ou le nombre de lignes de force par c. g. ; E , la perte d'énergie par hystérésis, par c. c. et par cycle, en ergs. Les valeurs se rapportent à un fil de fer doux, et s'étendent depuis les faibles aimantations jusque près de la saturation.

On voit, d'après le tableau I, que E dépend de B seulement et non de f , car pour les deux dernières valeurs, l'état de saturation a exigé de très grands Δf pour obtenir des ΔB à peu près égaux aux ΔB précédents ; les ΔE sont aussi à peu près égaux aux ΔE précédents.

On reconnaît aussi aisément que E augmente plus rapidement que B^1 et moins rapidement que B^2 . Ainsi, M. Steinmetz a été conduit à chercher si E n'est pas de la forme KB^m ; il a appliqué aux observations d'Ewing la méthode des moindres carrés et il a trouvé pour la *fonction de l'hystérésis* la forme suivante :

$$H = 0,002 B^{1,6}$$

dans laquelle H représente la perte d'énergie par hystérésis par cycle et par c. c., en ergs, pour le fer doux. On trou-

vera au tableau I, colonne 4, les valeurs de H calculées d'après la formule; la colonne 5 donne les valeurs absolues et la colonne 6 les valeurs relatives de $(E-H)$, différence des valeurs expérimentales et des valeurs calculées.

Comme on le voit, le résultat est très satisfaisant; les écarts, assez faibles d'ailleurs, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, ne révèlent dans les résultats de l'expérience aucune tendance à s'écarter des résultats calculés.

M. Steinmetz a en outre calculé, d'après sa formule, le tableau II qui est relatif au fer doux.

Tableau I.

f	B	E	H	E-H	en %
1,50	1974	410	375	35	8,5
1,95	3830	1160	1082	58	5,0
2,56	5950	2190	2190	0	0
3,01	7180	2940	2956	-16	-0,5
3,76	8790	3990	4080	-90	-2,3
4,96	10590	5560	5510	50	+0,9
6,62	11480	6160	6260	-100	-1,7
7,04	11960	6590	6690	-100	-1,5
26,5	13700	8690	8310	380	+4,4
75,2	15560	10040	10190	-150	-1,5

Tableau II.

B	H	B	H
1000	126	11000	5850
2000	382	12000	6720
3000	736	13000	7640
4000	1160	14000	8600
5000	1658	15000	9510
6000	2220	16000	10660
7000	2840	18000	12870
8000	3520	20000	15230
9000	4240	25000	21760
10000	5020	30000	29280

COLARD.

Séance de l'Association électro-technique allemande.

— M. Roos préconise les avantages des courants alternatifs dans les distributions électriques en les comparant avec les courants continus et accumulateurs. Les dimensions à donner aux accumulateurs dans une station centrale dépendent de la consommation maxima par heure relativement à la consommation par jour et du rendement.

Les usines à gaz fournissent des statistiques intéressantes à ce sujet.

Villes	Consommation maxima par jour	Consommation maxima par heure	Rapport 1/
Berlin	387 300 m ³	16 800 m ³	8,27 heures
Dresde	76 100 "	9 300 "	8,16 "
Essen	14 700 "	1 740 "	8,45 "
Barmen	36 050 "	4 500 "	8,01 "
Cologne	83 070 "	9 420 "	8,8 "

On doit adopter, pour le rapport 1/ les chiffres 8 et 9. Les usines électriques fonctionnant dans des conditions spéciales, ne peuvent guère fournir de chiffres précis.

Le tableau ci-dessous donnent quelques indications relatives aux dimensions relatives.

Rapport 1/	Durée de charge	Durée de décharge 70 %	Durée totale	Grandeurs de l'installation mécanique avec et sans accumulateurs
3,5 heu.	18,5 heu.	12,95	16,45	20 %
5 "	17 "	11,9	16,9	30 %
8 "	14 "	9,8	17,8	45 %
9 "	13 "	9,1	18,1	50 %

La Société Einbeck et Langen à Hagen a monté des accumulateurs à Barmen, Darmstadt et Dessau.

A Barmen les accumulateurs fournissent 1/3 de l'énergie totale. Ils ont dû être réparés parce que les plaques se sont déformées. L'effet utile d'abord 37 %, n'a pas dépassé 55,8 %. A Darmstadt les courts circuits ont nécessité des réparations. Les rendements tombés à 22 % sont montés à 38,6 % puis à 55,9 % et même partiellement à 77 %. Les batteries ne fournissent que 12 % de l'énergie totale.

A Dessau le rendement enregistré par un compteur Aron, a accusé 85 %.

Il résulte des chiffres de M. Ross que le rendement pour le système par courants alternatifs avec transformateur serait le double de celui par accumulateurs. Mais d'autre part on peut faire les machines 33 % plus petites : il est vrai que ces dernières coûtent 350 M. par cheval, tandis que les accumulateurs coûtent 400 M. Pour 1 pf. de charbon on a fourni 11,9 pf. de courant à Erberfeld ; et 12,45 pf. de courant à Barmen : ce qui constitue un léger avantage pour le système par accumulateurs. On a produit par kilogramme de charbon, 190 voltampères chez les abonnés.

D'après Müller, les appareils en verre ne sont pas bons. L'emploi de cuves en bois et plomb avec prismes en verre au fond donne lieu à des courts circuits dûs aux oxides qui s'y amoncellent. Le rendement peut aller jusqu'à 90 % si on charge et décharge normalement, il ne faut pas pousser le développement de gaz trop loin. Toutefois pour remettre une batterie en ordre, on est parfois obligé de charger plus fortement.

Les accumulateurs peuvent utilement servir à régler la tension, même en fraction de volt si on ajoute les rhéostats nécessaires. De plus il y a des appareils automatiques fonctionnant bien ; et souvent on installe encore des signaux optiques et acoustiques.

D'après M. Wilking les accumulateurs doivent donner un rendement de 72 %. A Dusseldorf les pertes par canalisation s'élèvent à 18 %, mais seulement dans les périodes les plus défavorables. Il faut prendre un juste rapport entre les machines et les accumulateurs.

D'après M. Dortmann, le rapport 1/ s'élève à 5,5 à Elberfeld et Mulhouse : c'est le chiffre qu'il faut envisager et non 9 heures comme à Berlin, qui est un cas exceptionnel. Les comparaisons faites ne sont pas exactes : le fonction-

nement diffère avec les conditions dans lesquelles on se trouve. Par exemple à Darmstadt, la proportion d'accumulateurs est très faible.

D'après M. Sieg, la résistance de l'acide détermine une perte de tension de 1 %, la polarisation quand on charge en 3 heures, 23 %, en 5 heures, 16 %, en 10 heures, 10 %.

La perte en intensité résulte du développement de gaz et peut atteindre 2 à 10 %. D'autre part il faut charger assez pour empêcher la formation de sulfate.

Enfin il faut considérer la perte de matière active. Dans les Tudor, 1/2 mm exige 10 semaines pour sa formation soit 1 heure 7 par $\frac{1}{1000}$ de mm. Pour refaire une quantité de matière tombée il faut beaucoup d'ampères.

D'après M. Müller, les mauvais rendements proviennent de ce qu'on a trop chargé les batteries. On a pris un courant de décharge trop fort (40 %) à Darmstadt.

K.

Société française de physique. — *Compteurs d'énergie électrique.* — M. Hospitalier passe rapidement en revue les principes sur lesquels sont fondés les appareils servant à la mesure industrielle de l'énergie électrique. Le problème à résoudre ne date guère que d'une dizaine d'années, lorsque les premières stations centrales de distribution de l'énergie électrique firent leur apparition. La multiplicité des solutions proposées, expérimentées, réalisées et établies en service courant sur une échelle plus ou moins importante depuis cette époque suffisent à en montrer toute l'importance industrielle.

Au début des installations, alors qu'on ne disposait d'aucun appareil satisfaisant, on se contentait de supprimer le problème en traitant à forfait, et à tant par an, suivant l'importance de l'installation qui, à cette époque, ne comportait que des appareils d'utilisation peu variés : lampes à arc et lampes à incandescence.

Mais cette solution transitoire dut être bientôt abandonnée, car elle ne donnait satisfaction ni au consommateur d'énergie électrique ni au vendeur. Pour comprendre comment des solutions plus complètes sont intervenues, il nous faut examiner les termes mêmes du problème.

Un compteur parfait a pour fonction, si nous envisageons le problème dans toute sa généralité, d'effectuer l'intégration de l'expression

$$\int e I dt$$

en appelant e la différence du potentiel aux bornes d'un appareil d'utilisation à un instant donné, et I l'intensité du courant qui le traverse au même instant.

L'appareil effectuant cette intégration est le plus complet de tous et constitue un *compteur d'énergie* ou *watts-heure-mètres*, car il intègre en fonction du temps la puissance en watts dépensée par un appareil donné et la mesure en watts-heure. Mais d'autres appareils plus simples doivent être examinés auparavant.

Compteurs de temps. — Si l'on suppose que la consommation d'un appareil donné reste constante pendant tout le temps de son fonctionnement, on voit que l'intégrale ci-dessus se réduit à faire intégrer la somme des intervalles de temps pendant lesquels le courant est fourni à l'appareil: le compteur se réduit alors à une simple horloge mise en marche lorsque le courant passe et arrêtée lorsque le courant cesse de passer. On réalise ainsi un compteur de temps ou heure-mètre dont l'emploi se justifie encore dans un certain nombre d'installations peu importantes, dans lesquelles tous les appareils d'utilisation sont mis en fonction et arrêtés en même temps.

Compteurs de quantité. — Lorsque l'on suppose la distribution effectuée sous une différence de potentiel constante, l'intégration à effectuer se réduit à

$$\int I dt$$

et l'appareil de mesure est alors un *compteur de quantité* ou un *ampère-heure-mètre*.

Les appareils appartenant à cette classe sont des plus nombreux : l'un des plus anciens est celui d'Edison, fondé sur l'action électrolytique. La quantité d'électricité fournie à l'abonné pendant un temps donné se déduit du poids de cuivre ou de zinc déposé dans une cuve électrolytique intercalée dans le circuit principal, et shuntée pour qu'elle ne soit traversée que par la millième partie du courant total. Le principal inconvénient de cet appareil réside dans l'absence d'indications : il n'est pas à lecture directe. Ce résultat n'est obtenu qu'avec les compteurs mécaniques.

Les compteurs mécaniques forment deux groupes : les compteurs-moteurs et les compteurs à intégration continue ou périodique.

Les premiers sont caractérisés par l'absence d'un dispositif mesurant le temps.

Ils consistent essentiellement en un système électrodynamique traversé par le courant à intégrer formant moteur, et d'un frein combiné pour que la vitesse angulaire du système tournant soit, à chaque instant, égale à l'intensité du courant qui le traverse. Dans ces conditions un compteur de tours commandé par l'axe du moteur intègre et fait connaître, par une simple lecture, à une constante près, la quantité d'électricité fournie à l'appareil.

C'est parmi les compteurs-moteurs que viennent se ranger les appareils de Siemens, de Lippmann, de Ferranti et celui de M. le professeur Forbes, mais dans ce dernier la rotation est obtenue en utilisant les propriétés *thermiques* du courant : une spirale métallique traversée par le courant total est disposée au-dessous d'un petit moulinet en mica analogue aux fumivores rotatifs montés sur certaines lampes à huile ou à gaz. Le

courant d'air chaud produit la rotation du moulinet qui commande un compteur de tours.

Les compteurs intégrateurs comportent toujours deux appareils associés : un mesureur de temps et un mesureur d'intensité. Le mesureur de temps a pour fonction de venir cueillir périodiquement, à des intervalles de temps variant en pratique, avec les appareils, entre un minimum d'une seconde et un maximum de cinq minutes, les indications fournies par l'appareil de mesure et de les traduire, par un mécanisme dont la simplicité constitue le principal mérite, par la rotation du premier mobile d'un compteur de tours, l'angle dont ce premier mobile a tourné étant proportionnel, dans chaque cueillette, à l'intensité du courant qui traversait l'appareil à l'instant où la cueillette a commencé. La somme des rotations ainsi effectuées représente, à une constante près, la quantité totale d'électricité fournie pendant la durée du fonctionnement.

C'est à cette classe de compteurs qu'appartiennent les appareils de MM. Cauderay, Frager, Jacquemier, etc.

Le mode d'intégration qui caractérise le compteur de M. le professeur Aron mérite une mention spéciale. Il se compose, en principe, de deux pendules synchrones, commandant un train différentiel auquel ils ne communiquent aucun mouvement. L'un de ces pendules a pour lentille un aimant qui oscille au-dessous d'une bobine fixe traversée par le courant total. Dans ces conditions, le courant qui traverse la bobine agit comme un système accroissant l'accélération due à la pesanteur pour l'un des pendules seulement, et il l'accélère. La différence de marche des deux appareils est, dans les limites d'emploi pratique, proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé la bobine, et vient s'enregistrer sur un cadran devant lequel se déplace une aiguille commandée par le train différentiel.

Intégrateurs de conductibilité. — Lorsque le potentiel de distribution est constant, l'énergie électrique fournie

à un circuit de conductibilité $\frac{I}{R}$ pendant un temps T a pour expression

$$e^2 \int_0^T \frac{I}{R} dt$$

Il suffit donc d'intégrer l'expression $\int \frac{I}{R} dt$ pour avoir,

à une constante près, la quantité d'énergie électrique fournie. Les appareils effectuant cette intégration sont des *compteurs-intégrateurs de conductibilité* ou des *mhos-heure-mètres*, car ils mesurent l'intégrale, en *mhos-heure*, de la conductibilité du circuit d'utilisation, le mho étant l'inverse de l'*ohm*, suivant une expression ingénieusement créée par Sir W. Thomson, comme la conductibilité est l'inverse de la résistance. Les compteurs de quantité, comme les intégrateurs de conductibilité, ont le grave défaut de ne donner des indications rigoureuses que si le potentiel de distribution reste constant. Lorsque ce potentiel baisse, ces deux appareils font payer trop cher l'énergie électrique fournie au consommateur. Ils la font payer, au contraire, moins cher lorsque le potentiel de distribution augmente.

Dans un cas comme dans l'autre, la qualité de l'énergie fournie est peu satisfaisante, car, dans le premier, les lampes n'éclairent pas, et dans l'autre elles sont dangereusement poussées au point de vue de leur conservation. Le compteur pratiquement idéal serait un appareil scientifiquement faux, qui cesserait de totaliser dès que le potentiel de distribution s'éloignerait dans des proportions notables de sa valeur normale.

Compteurs de potentiel. — Dans un certain nombre de distributions d'énergie électrique employées en Amérique, on maintient l'intensité constante, au lieu de maintenir le

potentiel de distribution constant, et les appareils d'utilisation sont montés en tension au lieu de l'être en dérivation. La mesure se réduit à effectuer l'intégrale de la différence de potentiel aux bornes en fonction du temps: le compteur est alors un volts-heure-mètre. Ces appareils n'ayant pas d'application en France, nous nous contentons de les signaler.

Compteurs d'énergie. — Les appareils effectuant l'intégration complète de l'expression

$$\int_0^T e I dt$$

sont des *compteurs d'énergie* ou des *watts-heure-mètres*. Les uns sont des compteurs-moteurs, les autres des wattmètres à intégration périodique.

Les compteurs-moteurs, tel que celui du professeur Elihu Thomson, sont constitués par un moteur électrique sans fer dans lequel le champ est produit par le courant principal et l'induit par une bobine à fil fin montée en dérivation sur la distribution.

Le couple électrodynamique est ainsi proportionnel au produit $e I$. L'axe vertical du moteur porte un disque de cuivre tournant entre trois aimants permanents, et il s'y développe des courants de Foucault qui constituent un frein électromagnétique. La vitesse étant à chaque instant proportionnelle au produit $e I$, le nombre de tours effectués par le moteur fait connaître l'énergie fournie pendant le même temps. L'étalonnage et la graduation sont rendus relativement faciles par le fait que l'appareil est construit pour que chaque watt-heure corresponde à un tour de l'arbre moteur.

Les watts-heure-mètres, ou compteurs d'énergie à intégration périodique, sont fondés sur le même principe général que les compteurs de quantité de la même caté-

gorie : l'appareil de mesure est seulement un wattmètre au lieu d'un ampèremètre.

A cette classe appartiennent les appareils de MM. Brillié, Cauderay, Clerc, Frager, Jacquemier, Marès, Richard frères, etc.

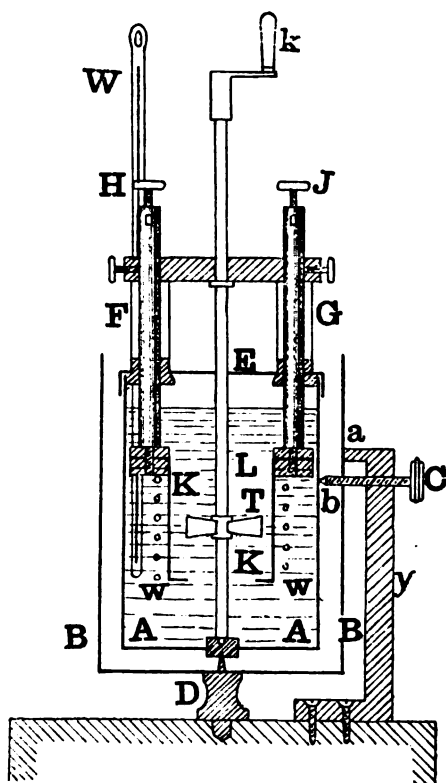
Sur le principe différence de durée d'oscillation de deux pendules, M. Aron a combiné un compteur d'énergie dans lequel l'un des pendules porte une bobine à fil fin oscillant à l'intérieur d'une bobine à gros fil, traversée par le courant total. La différence de marche des deux pendules mesure les watts-heures qui ont traversé l'appareil et se lit directement.

Tels sont les principes généraux des compteurs électriques actuellement réalisés.

Un grand nombre de ces appareils sont déjà en service sur les réseaux de distribution des principales Compagnies électriques. Il n'y a pas eu moins de 51 appareils présentés au Concours de compteurs institué par la Ville de Paris. Les expériences se poursuivent actuellement, mais nous devons en attendre les résultats avant de pouvoir exprimer une opinion sur la valeur industrielle de chacun d'eux.

Le Calorimètre ampèremétrique, de l'Institut physico-mécanique du Dr Edelmann, de Munich. (Traduit de *l'Electro-technische Zeitschrift de Berlin*, du 20 février 1891.) — On sait que la mesure absolue de l'intensité des courants alternatifs ne peut être exécutée avec une grande exactitude qu'en se basant sur leurs effets thermiques. C'est dans ce but que j'ai construit, il y a plusieurs années déjà, un calorimètre ampèremétrique qui, depuis, a été souvent employé et dont les dispositions sont représentées sur la figure.

On introduit dans un vase A, aussi bien isolé que possible au point de vue thermique, une quantité déter-



minée en poids d'un liquide mauvais conducteur : du pétrole raffiné par exemple ; on pourrait aussi employer de l'eau distillée, si la tension dans le liquide ne dépasse pas 0,9 v. L'isolement calorifique s'obtient en plaçant le liquide dans un vase A, de laiton parfaitement poli, entouré d'un autre vase B qui lui est concentrique. B est soutenu par les extrémités *a* de trois montants ; A est porté par les trois vis C, fixées dans les montants *y* et terminées par des pointes en ivoire *b*. Ces vis passent librement à travers des ouvertures *b* du vase extérieur B. Le fond

des récipients repose sur la tête pointue d'une pièce de bois D. Si l'on a soin que les vases soient toujours bien polis, l'expérience prouve que l'isolement calorifique ainsi obtenu est satisfaisant.

Le vase intérieur B se ferme à l'aide d'un couvercle en laiton laminé bien poli E, qui sert en même temps de support aux deux tubes FG. A l'intérieur de ces tubes, sont disposées deux tiges en cuivre, bien isolées au point de vue électriques; elles conduisent le courant à mesurer des bornes extérieures HJ jusque dans l'intérieur de l'appareil, où se trouve le fil de résistance ww . Ce fil est enroulé, de façon à empêcher la self induction, sur les deux gaines semi-cylindriques KK, ouvertes aux deux bouts, et complètement plongées dans le liquide calorimétrique.

Lorsque le fil w est traversé par le courant, il s'échauffe et communique sa chaleur au liquide L, qui est maintenu dans un état permanent de circulation dans le sens vertical au moyen de la turbine T et de la manivelle K; le liquide contourne ainsi les deux gaines KK. Un thermomètre W gradué en dixièmes de degrés et dont la boule plonge dans le liquide, sert à la lecture des changements de température.

Le procédé même de mesure est très-simple. Pour graduer l'appareil, on fait d'abord passer un courant continu d'intensité convenable à travers le calorimètre, et en même temps à travers un appareil de mesures absolues: galvanomètre ou voltamètre. On le laisse durer jusqu'à ce que la température du liquide se soit élevée de 15° à 20° C. Pendant tout ce temps, on maintient le liquide calorimétrique dans un état constant d'agitation. Alors, après un espace de temps qui ne doit ni dépasser 10 minutes, ni être inférieur à 100 secondes, on interrompt le courant et on note exactement l'intensité et la durée du courant et l'élévation de température.

Lorsque pour une autre mesure, on emploie dans le calorimètre la même résistance w , et naturellement aussi la même quantité du même liquide, il est facile de déterminer l'intensité du nouveau courant, puisque l'élévation de la température est proportionnelle à l'intensité du courant et à sa durée.

Il va sans dire qu'on ne pourra mesurer avec une grande exactitude que les courants dont l'intensité ne s'écarte pas beaucoup de celle du courant qui a servi à l'étalonnage. Il faudra donc, par des mesures comprises entre des limites assez étendues, graduer le calorimètre en prenant des courants d'intensités différentes, en employant des résistances w appropriées à ces intensités. Il sera préférable de se servir de plusieurs calorimètres. D'une façon générale, on peut employer aussi le calorimètre pour graduer d'autres instruments qui renferment des bobines, tels que les dynamomètres de torsion.

D'ordinaire, je donne au fil w une résistance de 1 ohm, à moins que sa destination n'en exige autrement. Il est facile de placer le fil dans l'appareil ; l'instrument peut donc servir à déterminer les constantes de température des substances conductrices mises sous forme de fils. Dans ce dernier cas, on n'emploie que le vase intérieur et ses accessoires : on le place sur une flamme de Bunzen pour l'amener à la température voulue.

COLARD.

SÉANCE DU 22 MARS 1891

Présidence de M. de Weydlich, président.

Ont signé la liste de présence MM. Bayet, Colard, Coune, De Bast, Demarteau, Durand, Farman, Francken, Gérard Emile, Libert, Orban et de Weydlich.

En l'absence du secrétaire-général empêché, M. Colard, secrétaire, propose de remettre à une prochaine réunion l'approbation du procès-verbal de la séance du 22 février dont l'impression n'est pas encore terminée. Adopté.

Sur la proposition du Comité, l'assemblée confère à l'unanimité le titre de membre associé à MM. Hen, Léon, ancien officier du génie, ancien professeur à l'école militaire, fabricant de câbles électriques à Bruxelles et Weinman, associé du premier.

La parole est ensuite donnée à notre camarade M. Bayet pour l'exposition du travail ci-après :

Comparaison entre l'air comprimé et l'électricité comme agent de transport de force à distance.

Dans une précédente communication, j'ai parlé du transport de l'énergie par les courants alternatifs et j'ai cité, comme point de comparaison, ce qu'on pourrait obtenir en employant l'air comprimé.

Mais, depuis, M. le professeur Riedler, de Berlin, a fait paraître un travail (1) très-intéressant, donnant les résultats d'expériences nombreuses, qu'il a eu l'occasion de faire avec M. Gutermuth, professeur à Aix-la-Chapelle, sur l'installation d'air comprimé à Paris.

(1) Neue erfahrungen uber die Kraftversorgung von Paris durch Druckluft (système Popp).

Les chiffres publiés dans ce travail sont tellement favorables à l'air comprimé, qu'ils rouvrent la discussion sur le point de savoir qui, de l'air comprimé ou de l'électricité, l'emporte finalement comme agent de transport à longue distance.

La question étant des plus importantes, je crois qu'il est bon d'exposer assez longuement la théorie du transport par l'air, ainsi que les faits acquis par la pratique, et de montrer les améliorations qui peuvent être encore faites.

Le premier travail qui ait été publié sur les résultats obtenus à Paris par la Compagnie Parisienne de l'air comprimé (procédés Victor Popp) est celui du professeur Radinger, de Vienne (2).

En expérimentant sur un aéromoteur de 8 chevaux, il trouve que par cheval-heure indiqué au cylindre, on dépense, en marchant avec de l'air froid, $31^{\text{m}^3},9$; avec de l'air chauffé à 170° , $19^{\text{m}^3},3$, enfin, en injectant de la vapeur d'eau dans de l'air chauffé à 170° , la dépense n'est plus que de $14^{\text{m}^3},8$; mais pour arriver à ce résultat on consomme par cheval-heure 0,3 kg. de coke et 4 litres d'eau.

En novembre 1888, M. J. François, ingénieur civil à Seraing, publiait un rapport sur l'installation parisienne, dans lequel il déclarait qu'on pouvait obtenir par cheval-heure indiqué aux cylindres de l'aéromoteur, une dépense de $23^{\text{m}^3},3$ pour la marche à air froid, $16^{\text{m}^3},6$ pour la marche avec de l'air chauffé à 200° et $12^{\text{m}^3},25$ pour la marche à air chaud et vapeur d'eau, le mélange étant porté à une température de 200° , ce qui nécessiterait une dépense supplémentaire de 3 litres d'eau et 0,2 kg. de coke.

(2) Wochenschrift des österreichischen ingenieure und architekten vereines; n° du 15 février 1809.

Ces chiffres sont bien différents de ceux trouvés par Radinger.

M. Riedler trouve par cheval-heure indiqué une dépense de 12^m3,02, l'air étant chauffé à 160°, et des expériences qu'il a faites sur la résistance de l'air dans les conduites, il conclut que pour un transport à 12 kilom. de distance, le rendement serait de 97,2 %; à 26 kilom. de 91,3 %; à 40 kilom. de 86,8 %, et à 60 kilom. de 76,2 %.

Ces chiffres peuvent paraître exagérés aux personnes qui n'ont pas approfondi la question; il importe donc de montrer comment on y arrive.

Compresseurs. — Il existe, comme on le sait, pour les gaz deux courbes de compression ou de détente: l'isothermale et l'adiabatique.

La formule donnant le travail nécessaire à la compression isothermale d'un gaz est $T = P_2 V_2 \log. \text{ nép. } \frac{P_1}{P_2}$ (1)
équation dans laquelle :

T est le travail de compression exprimé en kgm. ;

P_2 , la pression atmosphérique ;

V_2 , le volume d'air à la pression atmosphérique, qu'il faut comprimer ;

P_1 , la pression en atmosphères absolues à la fin de la compression.

Si la compression s'effectue adiabatiquement, l'équation donnant le travail nécessaire est

$$T = \frac{K}{K-1} P_2 V_2 \left[\frac{P_1^{\frac{K-1}{K}}}{P_2^{\frac{K-1}{K}}} - 1 \right] \quad (2)$$

Pour l'air, $K = 1,41$; d'où, en remplaçant dans l'équation (2) les coefficients par leurs valeurs numériques, on a

$$T = 3,43902 P_2 V_2 \left(\frac{P_1^{0,29}}{P_2^{0,29}} - 1 \right) \quad (3)$$

En pratique, la courbe suivant laquelle s'effectue la compression est comprise entre l'isothermale et l'adiabatique, ou bien est l'adiabatique elle-même.

Si P_1 représente la pression à laquelle nous voulons comprimer l'air, celle qui règne dans les conduites à la sortie du compresseur, il peut se faire que le travail nécessité par la compression d'un volume d'air donné, soit plus grand que celui qu'on calculerait au moyen de l'équation (3), qui se rapporte à une compression adiabatique..

En effet, à l'intérieur du cylindre, la pression jusqu'à laquelle on comprime l'air est toujours supérieure à celle qui règne dans les conduites ; cet accroissement de pression représente le travail qu'il faut faire pour vaincre les résistances pendant le refoulement. Ces résistances proviennent du poids des soupapes à soulever et de la vitesse quelquefois exagérée que l'air prend, quand la section de passage qui lui est offerte est trop petite.

Il faudrait trouver un terme permettant de juger les différents systèmes de compresseurs.

Ce terme est ce qu'on appelle le rendement dynamique ou simplement le rendement du compresseur. C'est le rapport entre le travail minimum à faire pour comprimer une quantité d'air donnée à la pression qui règne dans les conduites de l'usine, travail donné par une compression isothermale et que nous calculerons d'après l'équation (1), et le travail réellement développé pour comprimer cette même quantité d'air, travail qui nous sera donné par les diagrammes pris sur les cylindres à vapeur.

On distingue encore le rendement mécanique et le rendement volumétrique d'un compresseur.

On appelle rendement mécanique le rapport entre le travail indiqué aux cylindres à air et celui indiqué aux cylindres à vapeur ; c'est le terme qui nous donne la perte provenant des frottements mécaniques.

On appelle rendement volumétrique, le rapport entre le volume d'air que le compresseur aspire en un temps donné et le volume d'air maximum qu'il aurait pu aspirer pendant le même temps. Le volume maximum que le compresseur peut aspirer en un temps donné, est égal au volume d'une cylindrée multiplié par le nombre de cylindrées qui ont lieu pendant le temps considéré. Nous dirons plus loin comment on mesure la quantité d'air aspirée en un temps donné.

A l'usine centrale de la rue St-Fargeau, à Paris, nous trouvons différents systèmes de compresseurs : les systèmes Blanchodt, Dubois et François, et Riedler, marchant tous trois à la même pression et tournant à la même vitesse de 38 tours par minute.

Compresseur Blanchodt. — C'est un compresseur à soupapes d'aspiration commandées. Il n'y en a qu'une de chaque côté du cylindre. Elles consistent en un disque en bronze de grand diamètre faisant corps avec la boîte à bourrage; le mouvement du piston ouvre et ferme ces soupapes dont la levée se règle facilement. L'eau destinée à refroidir l'air et à remplir l'espace nuisible entre par les soupapes d'aspiration.

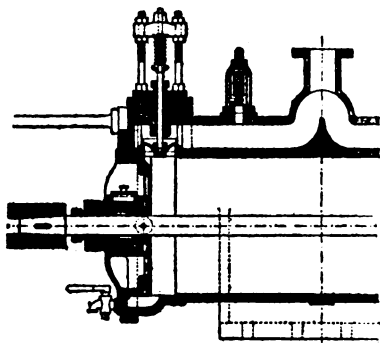


Fig. 1. — Echelle $\frac{1}{32}$

Le système de commande des soupapes est donc fort simple, mais il oblige à avoir une faible levée à cause des chocs que reçoit la soupape en retombant sur son siège. L'espace nuisible dans ce compresseur est très-restreint en vue d'avoir un bon rendement volumétrique. Mais l'exiguité de cet espace a un grand défaut, c'est qu'il oblige à introduire fort peu d'eau dans les cylindres pour éviter les coups de bélier à fond de course ; par conséquent la courbe de compression sera voisine de l'adiabatique. L'air sortant du compresseur est en moyenne à une température de 50°.

Cherchons quel est le rendement de ce compresseur.

M. Riedler trouve que par cheval-vapeur indiqué on peut comprimer 7,5 mètres cubes d'air pris à la pression atmosphérique.

Or, pour comprimer isothermalement un mètre cube d'air à la pression de 6 kilogr. effectifs, soit 7 kilogr. absolus, il faut un travail de

$$T = P_3 \log. \text{nép.} \frac{P_1}{P_2} = 20108 \text{ kilogrammètres.}$$

Désignons ce travail par I_1 . Par cheval-heure indiqué, nous pouvons donc produire au maximum

$$\frac{3600 \times 75}{20108} = \frac{270000}{20108} = 13,42 \text{ m}^3.$$

Le rendement du compresseur Blanchodt serait donc de

$$\frac{7,5}{13,42} = 0,557.$$

Aux essais officiels de réception, on a trouvé des résultats un peu différents. Le rendement mécanique était de 0,88, et le travail indiqué aux cylindres à air, était égal à 1,419 I_1 ; par conséquent le travail indiqué aux cylindres à vapeur est $\frac{1,419 I_1}{0,88}$, et le rendement dynamique est

$$\frac{I_1}{\frac{1,419 I_1}{0,88}} = \frac{0,88}{1,419} = 0,62.$$

Par cheval-heure indiqué, on comprime donc $13,42 \times 0,62 = 8,32\text{m}^3$.

Remarquons que si le travail de compression avait été calculé en admettant une compression adiabatique, le travail indiqué aux cylindres à air n'aurait dû être que $1,32 I_*$, et le rendement dynamique eût été de

$$\frac{0,88}{1,31} = 0,67$$

M. Kennedy, dans un essai qu'il fit sur ces compresseurs, trouva un rendement de 0,65; la température de l'air s'échappant du compresseur était d'environ 50° .

Compresseur Dubois et François. — Les figures 2, 3 et 4 donnent les détails du compresseur Dubois et François se trouvant à l'usine St-Fargeau, avec les dernières modifications que ces constructeurs y ont apportées. Il a deux soupapes d'aspiration de chaque côté du cylindre; ces soupapes représentées en *a* (fig. 2) sont commandées par des ressorts à boudin agissant sur des

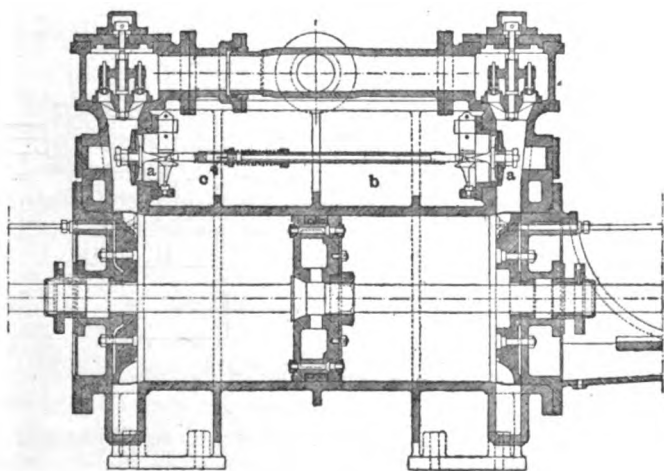
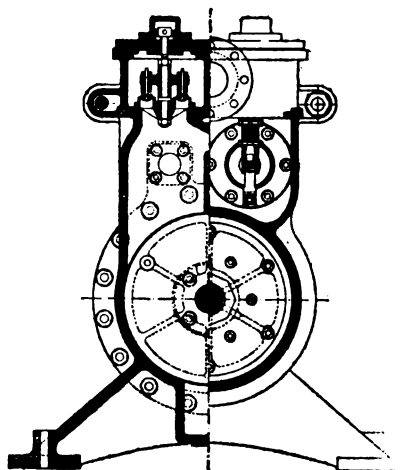
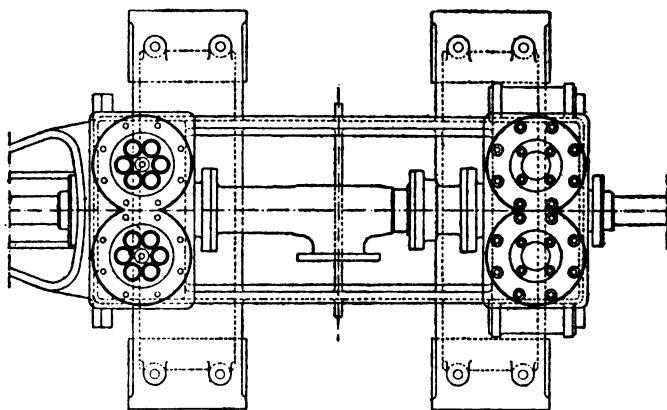


Fig. 2. — Echelle $\frac{1}{30}$

Fig. 3. — Echelle $\frac{1}{30}$ Fig. 4. — Echelle $\frac{1}{30}$

tiges *b* passées sur deux couteaux qui oscillent sur des chapes en acier. L'une des tiges est creuse, l'autre pleine; les deux tiges sont rendues solidaires l'une de l'autre par

une clavette *c*. La tension du ressort réglant les soupapes d'aspiration s'obtient, au moyen d'une vis de pression, en déplaçant celle-ci le long de la tige creuse. Les compresseurs devaient tourner à 38 tours par minute, et les soupapes de refoulement étaient primitivement des soupapes en bronze d'assez grand diamètre; mais en vue de pouvoir marcher à une plus grande vitesse, on les a remplacées par des soupapes multiples très-légères et donnant une grande section de passage à l'air.

Comme dans le compresseur Blanchodt, l'eau est admise par les soupapes d'aspiration; elle a pour fonction de refroidir l'air et de diminuer en même temps l'effet de l'espace mort.

Mais l'eau ainsi introduite en nappe ne refroidit qu'imparfaitement; si par un moyen quelconque, on la pulvérisait, elle se mélangerait intimement à l'air contenu dans le cylindre et donnerait un refroidissement d'autant plus considérable que la pulvérisation serait mieux faite. Le moyen le plus simple et le plus efficace pour obtenir une bonne pulvérisation, consiste à diviser l'eau en jets fort minces qui viennent se briser sur une paroi placée à une faible distance de l'orifice par où l'eau s'échappe. Ces pulvérisateurs se trouvent naturellement à l'intérieur du cylindre en *d*,

Théoriquement la pulvérisation devrait se faire pendant la compression seulement et être d'autant plus forte que la pression croît à l'intérieur du cylindre.

Mais dans la pratique, afin d'éviter des complications de mécanisme, on préfère faire marcher la pulvérisation d'une manière continue. L'eau qui arrive aux pulvérisateurs devra donc être comprimée à une pression supérieure à celle qui règne dans le cylindre à la fin de la compression, pour qu'à ce moment les pulvérisateurs puissent encore débiter de l'eau. Dans les compresseurs Dubois et François la pression à laquelle on comprime

l'eau destinée à alimenter les pulvérisateurs, est le double de la pression à laquelle on comprime l'air.

Aux essais officiels de réception, on a trouvé par cheval indiqué et par heure une production de $8,57\text{m}^3$, soit un rendement dynamique de $\frac{8,57}{13,42} = 0,64$. L'air n'avait subi qu'une augmentation de température de 8 à 10° pendant la compression.

Le rendement mécanique était de 85,6; en d'autres termes, le travail indiqué aux cylindres à air était égal à 1,335 I.

Nous avons vu que si la compression s'était faite suivant l'adiabatique, le travail indiqué aux cylindres à air n'aurait dû être que de 1,31 I. Il y a donc là quelque chose d'anormal, puisque l'air sortait absolument froid, ce qui indique que la courbe de compression était voisine de l'isothermale, et que malgré cela la compression demande encore plus de travail que si elle s'était effectuée suivant une adiabatique; la pression dans le cylindre n'était cependant que de quelques dixièmes supérieure à la pression régnant dans les conduites. Ce fait singulier laissant subsister des doutes dans mon esprit, et les résultats obtenus aux essais ne répondant pas à ce qu'on obtient généralement avec ces compresseurs, je fis, quelque temps après les essais officiels, des expériences qui me donnèrent les résultats suivants. Le rendement mécanique était de 0,85, et le travail indiqué aux cylindres à air 1,141 I. Le rendement dynamique était donc

$$\frac{I.}{1,141 I.} = \frac{0,85}{1,141} = 0,745.$$

Par cheval-heure indiqué on produit donc $13,42 \times 0,745 = 10\text{m}^3$ d'air.

M. Riedler, à son tour, trouve $8,5\text{m}^3$ par cheval indiqué et par heure.

Ces différences proviennent principalement de la difficulté de connaître exactement le rendement volumétrique d'un compresseur.

Cette détermination doit se faire avec soin et, pour la faire avec une précision suffisante, il serait désirable de trouver une méthode qui permît, en marche normale, de voir si le rendement volumétrique n'a pas changé, c'est-à-dire si tous les organes du compresseur sont en bon état.

Le rendement volumétrique se détermine de deux manières : d'abord par le jaugeage, ensuite par l'inspection du diagramme relevé sur les cylindres à air.

Première méthode. — Le jaugeage. — Cette méthode consiste à comprimer dans des réservoirs de capacité suffisante l'air jusqu'à la pression que l'on veut obtenir.

Les réservoirs, la tuyauterie qui les relie entre eux, ainsi que celle qui les réunit au compresseur, sont soigneusement jaugés; on s'assure que le tout est bien étanche et qu'il n'y a pas de fuite. On met alors la machine en marche, puis on compte le nombre de tours qu'elle doit faire pour amener la pression dans les réservoirs jusqu'à une valeur donnée; on note la température de l'air dans les réservoirs et on tient également compte de la quantité d'eau qui a été injectée dans les cylindres. On connaît ainsi la quantité d'air fournie par cylindrée, en se basant sur le volume d'une cylindrée, et on en déduit le rendement volumétrique.

Cette méthode n'est pas tout-à-fait exacte, car la pression augmente graduellement, et le rendement volumétrique varie avec la pression. Il faudrait donc opérer à pression constante et pour cela disposer d'un bassin manométrique, c'est-à-dire d'une colonne d'eau d'une hauteur équivalente à la pression qu'on veut avoir. Au commencement de l'expérience, les réservoirs seraient remplis d'eau, et cette eau serait refroidie par l'air comprimé dans un bassin supérieur.

Mais il est bien rare qu'on puisse opérer de cette manière, et si la puissance du compresseur devient trop grande, la capacité des réservoirs devant être elle-même fort grande, le jaugeage devient impossible.

On emploiera dans ce cas la seconde méthode, qui consiste à estimer le rendement volumétrique par l'inspection des diagrammes tirés sur les cylindres à air.

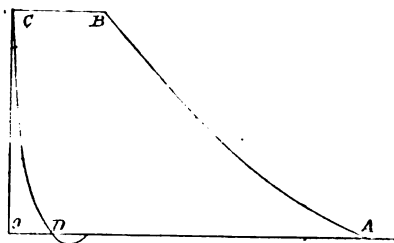


Fig. 5.

Considérons un de ces diagrammes. OA est la ligne atmosphérique; en A le cylindre est complètement rempli d'air à la pression atmosphérique; la compression commence en ce point et se poursuit jusqu'en B . La pression étant devenue suffisante, les soupapes de refoulement se lèvent et l'air est refoulé dans la conduite. S'il n'y avait pas d'espace nuisible, tout l'air serait expulsé et le crayon de l'indicateur, arrivé en c , retomberait en O suivant une perpendiculaire. Le rendement dans ce cas serait 100 %. Mais il y a toujours un certain espace nuisible, et l'air contenu dans celui-ci va se détendre pendant la course rétrograde du piston et arrive, en D , à avoir la pression atmosphérique. OD est par conséquent le volume d'air qui n'a pas été expulsé du cylindre, et DA représente le volume d'air refoulé dans la conduite. OA étant le volume du cylindre, le rendement volumétrique sera $\frac{DA}{OA}$.

Le principe de cette méthode est juste, mais il y a plusieurs objections à faire quant à son application.

Beaucoup de défauts d'étanchéité ne peuvent se découvrir ; si les segments du piston laissent passer l'air, si les soupapes de refoulement fuient, il est impossible de s'en rendre compte par l'inspection du diagramme ; on s'assurera donc auparavant que ces défauts n'existent pas. De plus, si les soupapes d'aspiration sont simplement commandées par des ressorts, le temps que met la soupape à retomber sur son siège, est à peu près toujours le même quelle que soit la vitesse à laquelle on marche, mais la fraction de la course du piston parcourue avant que la soupape d'aspiration ne soit fermée sera d'autant plus grande, que la vitesse du piston est elle-même plus grande.

Or, pendant le temps que les soupapes d'aspiration mettent à retomber, le piston refoule de l'air dans l'atmosphère ; il s'en suit que le rendement volumétrique doit être moindre à grande vitesse qu'à faible vitesse. Ce n'est qu'en superposant les diagrammes obtenus à des vitesses différentes qu'on s'aperçoit que dans certains cas, il en est réellement ainsi. Si le compresseur aspirait la même quantité d'air, les courbes de compression devraient se superposer ; celle obtenue à grande vitesse finirait même par être au-dessus de la courbe obtenue à un nombre de tours moindre, car le refroidissement de l'air est moindre à grande qu'à faible vitesse. Si, au contraire, la diminution du rendement volumétrique avec la vitesse a lieu, la courbe obtenue à grande vitesse sera au-dessous de celle obtenue à une vitesse moindre, ce qui prouvera qu'il y a moins d'air dans le cylindre. Pour les compresseurs où les soupapes d'aspiration sont commandées, la fraction de la course du piston qui leur est nécessaire de parcourir pour se fermer est non-seulement connue, mais est toujours la même quelle que soit la vitesse à laquelle on marche. On le voit, le rendement volumétrique pris au diagramme tendrait à donner toujours un chiffre un peu plus fort que la réalité ; mais si on ne prend pas certaines

précautions, les indications données par le diagramme peuvent être faussées, et donner alors un rendement volumétrique plus faible que la réalité, et c'est je crois ce qui est arrivé pour les essais faits avec le compresseur Dubois-François.

Comme nous l'avons vu, celui-ci contient toujours un matelas d'eau à l'intérieur du cylindre et c'est ce qui fausse les indications du diagramme.

Ainsi, on observe très-souvent, lors de la descente du piston de l'indicateur, un ou deux soubresauts qui sont dus à de l'eau qui s'est introduite dans l'appareil.

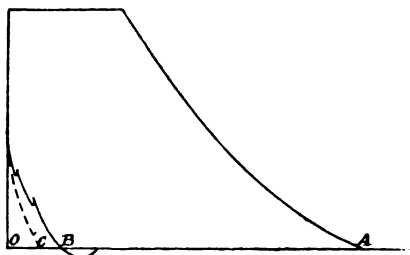


Fig. 6.

Le rendement volumétrique indiqué au diagramme est donné par $\frac{B A}{O A}$, tandis que le véritable rendement est celui qu'on aurait obtenu si la courbe de détente de l'air restant dans l'espace nuisible avait été bien indiquée, c'est-à-dire la courbe marquée en pointillé et le rendement volumétrique eût été $\frac{A C}{O A}$, plus grand que $\frac{A B}{O A}$.

Si les robinets de l'indicateur de fuient pas et si le piston de celui-ci ne donne lieu à aucune perte d'air, l'appareil sera toujours chaud ; il n'y a que de l'air dans l'indicateur et les diagrammes seront corrects. Si, au contraire, l'appareil est froid, c'est que de l'eau s'y introduit et les diagrammes présenteront les soubresauts que j'ai indiqué.

C'est à cette cause que j'attribue en grande partie la différence entre le chiffre que j'ai obtenu pour le rendement dynamique du compresseur Dubois et François et le chiffre trouvé aux essais officiels.

Aux essais officiels du compresseur Blanchodt, le rendement volumétrique avait été estimé par jaugeage.

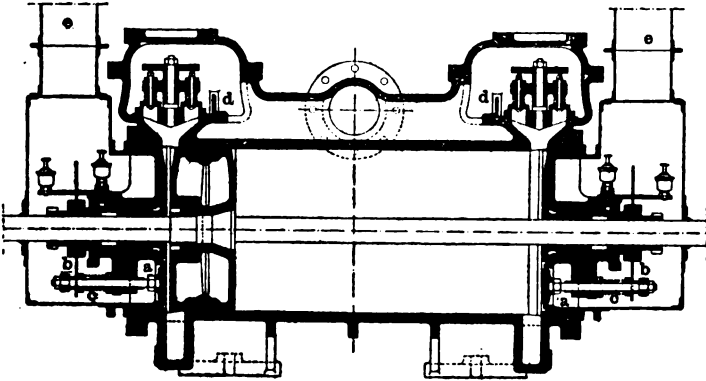


Fig. 7.

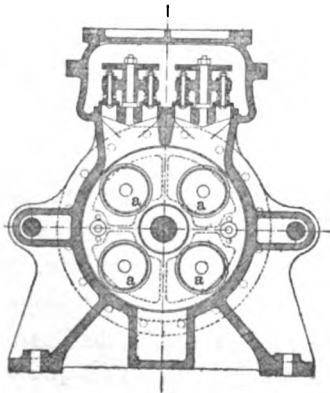


Fig. 8.

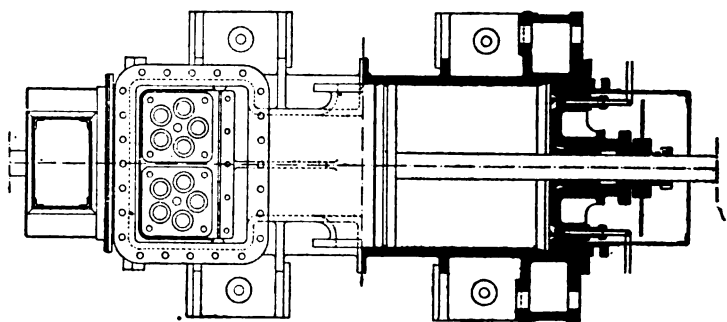


Fig. 9.

Les figures 7, 8 et 9 donnent les détails des nouveaux compresseurs François dont plusieurs sont actuellement en construction. Dans ce système, on a réduit au minimum l'espace nuisible, et, dans ce but, les soupapes d'aspiration ont été mises sur les couvercles des cylindres. L'eau destinée à refroidir l'air est ainsi pulvérisée. Les soupapes d'aspiration sont commandées et le moyen employé est dérivé de celui utilisé dans le compresseur Blanchodt.

Nous avons vu que dans ce dernier, le système de commande était fort simple, mais présentait le défaut de donner fort peu de levée à l'unique soupape d'aspiration. La section de passage est ainsi assez réduite malgré le grand diamètre de la soupape. M. François préfère, avec raison, employer des soupapes multiples.

Les soupapes d'aspiration sont représentées en *a* (fig. 7); une plaque *b* solidaire de la boîte à bourrage et pouvant se mouvoir avec celle-ci, entre de certaines limites réglables à volonté, écrase pendant la période d'aspiration les ressorts *c* commandant les soupapes.

Celles-ci sont donc libres de se mouvoir et restent ouvertes pendant toute la durée de l'aspiration; dans la course rétrograde du piston, la plaque *b* se mouvant en sens inverse lâche les ressorts et les soupapes d'aspiration

retombent sur leur siège. Ce système permet de régler la levée des soupapes comme on veut et de la faire plus grande que dans le compresseur Blanchodt; la section de passage offerte à l'air pendant l'aspiration peut donc être très-grande. Pour le refoulement, on emploie également des soupapes multiples; une cornière *d* maintient avec les soupapes une nappe d'eau qui a pour but d'assurer leur étanchéité.

Dans le compresseur représenté figures 7, 8 et 9, l'air est pris à l'intérieur du hall des machines par les cheminées d'appel figurées en *e*. Un de ces compresseurs est actuellement en montage à l'un des charbonnages de la Société Cockerill. J'aurai l'occasion d'y revenir lors que les essais auront été faits. L'avantage de ce système est de permettre de marcher à un grand nombre de tours tout en conservant un excellent rendement volumétrique.

Compresseur Riedler. — M. Riedler emploie un compresseur compound à soupapes commandées. L'air est aspiré dans l'atmosphère par un premier cylindre (cylindre à basse pression); de là il passe dans un réservoir où il est repris dans un deuxième cylindre (à haute pression) qui le refoule dans la conduite. Il faut donc deux cylindries pour comprimer l'air, tandis que dans les compresseurs ordinaires, il n'en faut qu'une. Si le nombre de tours par minute est le même pour les deux systèmes, le refroidissement de l'air sera beaucoup plus efficace dans le compresseur compound, puisqu'on injecte de l'eau pulvérisée à la fois dans le premier cylindre, dans l'espace intermédiaire, et dans le deuxième cylindre, et que le temps pendant lequel l'air séjourne dans le compresseur est le double de celui que nous aurions avec un compresseur ordinaire.

La figure 10 donne un diagramme tiré sur le compresseur Riedler; on peut remarquer que la courbe de compression dans les deux cylindres se rapproche assez bien l'adiabatique correspondant à chacun d'eux, et que le

bénéfice principal provient du refroidissement opéré dans le réservoir intermédiaire. Si la pulvérisation est bien faite, le compresseur compound doit donner un rendement dynamique plus élevé que les compresseurs ordinaires, le nombre de tours restant le même dans les deux cas. C'est cette raison qui a certainement déterminé M. Riedler à employer la compression par gradation, système employé depuis longtemps déjà, dans un autre but, par différents constructeurs.

Par cheval-vapeur indiqué et par heure, le compresseur Riedler produit 10,4 à 10,6m³ d'air, ce qui donne un rendement dynamique de 77,5 à 79 %.

On a déjà obtenu des rendements plus élevés; avec le compresseur Cornet, qui cependant n'est pas compound, on a trouvé, en effet, que le travail indiqué aux cylindres à air était de 1,016 I., et le rendement mécanique de 0,8553; le rendement dynamique devenait :

$$\frac{I.}{\frac{1,016 I.}{0,8553}} = \frac{0,8553}{1,016} = 0,8418.$$

La compression n'était poussée que jusque 5,21 atmosphères absolues; mais en continuant la courbe de compression, on trouve qu'on serait arrivé à 82 % de rendement en comprimant à 7 atmosphères absolues; ce compresseur tournait à la même vitesse que ceux dont nous venons de parler. Le compresseur Cornet est donc celui qui jusqu'à présent a donné les meilleurs résultats, qui ne sont dûs qu'à une pulvérisation bien faite.

Nous concluerons donc de ce qui précède qu'actuellement on peut obtenir des compresseurs dont le rendement est compris entre 75 et 80 %.

Jusque dans ces dernières années, les compresseurs n'ont été employés que dans les percements de tunnels et dans les charbonnages, et là le rendement a peu d'importance; pour le but que nous poursuivons, ces compres-

seurs rustiques ne peuvent évidemment nous servir. Ceux que nous emploierons auront un espace nuisible restreint; la pulvérisation de l'eau sera bien faite et nous n'aurons que de l'eau pulvérisée pour refroidir l'air; les soupapes d'aspiration seront commandées en vue d'augmenter le rendement volumétrique, enfin la compression se fera par gradation.

Cette dernière condition n'est pas absolument réalisée pour augmenter le rendement dynamique; nous avons vu, en effet, qu'avec des compresseurs ordinaires et une pulvérisation bien faite, on arrivait à un résultat très-satisfaisant pour une compression à 7 atmosphères absolues; ainsi le compresseur Cornet nous donnerait 82 % alors que le maximum de rendement dynamique qu'on puisse obtenir est de 85 %, valeur du rendement mécanique. Mais le compresseur compound nous permettra d'avoir une compression se rapprochant de l'isothermale tout en marchant à un nombre de tours assez considérable. L'installation de l'usine, dans ce cas, coûtera moins, autrement dit le rendement du capital sera augmenté, ce qui est certainement aussi important que d'augmenter le rendement dynamique.

Distribution à 6 atmosphères. — Nous allons d'abord traiter le problème de la distribution de la force par l'air comprimé, en admettant que la pression de régime soit de 6 atmosphères, comme c'est le cas pour Paris; cela nous permettra de mieux juger le système, en nous servant des résultats observés. Plus tard nous examinerons si c'est là la meilleure solution et s'il ne vaudrait pas mieux changer la pression de régime.

Avec une pression de 7 atmosphères absolues, admettons que le rendement moyen de nos compresseurs soit de 75 %.

Le travail nécessité par la compression de l'air suivant la loi de Mariotte, est donné par l'équation

$$T = P_2 V_2 \log. \text{ nép. } \frac{P_1}{P_2} (1).$$

Pour avoir le travail nécessité par la compression d'un kilog. d'air, il faut remplacer dans cette équation V_2 par le volume occupé par un kilog. d'air à la pression atmosphérique moyenne et à la température moyenne de 15° centigrades.

Les lois de Mariotte et Gay Lussac combinées donnent l'équation bien connue

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_0 V_0}{T_0} = R = 29,261,$$

$$\text{d'où } V_2 = \frac{R T_2}{P_2}.$$

En remplaçant dans l'équation (1) on a

$$T = P_2 T_2 \times 2,3026 \log. \frac{P_1}{P_2} = 19404 \log. \frac{P_1}{P_2}$$

Pour $P_1 = 7$, $T = 16400$ kilogm.

Le rendement dynamique étant 75 %, le travail indiqué aux cylindres à vapeur par kilog. d'air sera de

$$\frac{16400}{0,75} = 21900 \text{ kilogm.}$$

Le rendement mécanique des compresseurs étant en général de 85 %, le travail indiqué aux cylindres compresseurs par kilog. d'air sera de $21900 \times 0,85 = 18615$ kilogm.

Le travail qu'on aurait dû faire théoriquement aux cylindres à air est 16400 kilogm.; on voit donc qu'un compresseur dont le rendement dynamique est de 75 %, permet un écart de $\frac{18615 - 16400}{16400} = 13,3$ % avec la loi de Mariotte.

Par cheval-heure indiqué nous produirons

$$\frac{270000}{21900} = 12,37 \text{ kilog. d'air;}$$

on peut obtenir, pour une machine à vapeur compound à condensation, la garantie de 800 grammes de charbon pur (cendres déduites) par cheval-heure indiqué; aux essais on

obtiendra donc un kilog. d'air comprimé avec une dépense de $\frac{800}{12,37} = 65$ grammes de charbon.

Par mètre cube d'air aspiré, le travail indiqué aux cylindres à vapeur sera de

$$\frac{P_2 \log. \text{nép. } \frac{P_1}{P_2}}{0,75} = \frac{23793 \log. \frac{P_1}{P_2}}{0,75} = 26800 \text{ kilogm.}$$

Un cheval-vapeur peut donc comprimer

$$\frac{270000}{26800} = 10,07 \text{ m}^3$$

d'air par heure; un mètre cube d'air demande par conséquent une consommation de $\frac{800}{10,07} = 80$ grammes de charbon. A cette dépense, il faut encore ajouter celle qui provient de la compression de l'eau destinée aux pulvérisateurs et qui est de 3 à 5 %.

Aéromoteurs. — Comment déterminer le rendement de transport dans le cas de l'air comprimé? Par définition, ce rendement de transport, c'est le travail utile recueilli en ville, quand on produit un cheval utile à l'usine; ou bien, si les pertes par frottements des moteurs à l'usine et en ville sont dans le même rapport, comme c'est le cas pour les compresseurs et les aéromoteurs, le rendement de transport sera aussi le travail indiqué en ville quand à l'usine nous produirons un cheval-vapeur indiqué. Plus particulièrement pour l'air comprimé, nous pouvons dire que ce rendement est le rapport entre le nombre de kilogrammètres indiqués par kilog. d'air aux cylindres de l'aéromoteur et le nombre de kilogrammètres indiqués aux cylindres à vapeur du compresseur par kilogramme d'air.

Ou bien encore, le rendement sera le rapport entre le nombre de mètres cubes que peut produire par heure un cheval-vapeur indiqué ($10,07 \text{ m}^3$) et le nombre de mètres cubes nécessaires pour produire un cheval-heure indiqué aux cylindres de l'aéromoteur.

On peut distinguer 4 classes de moteurs à air :

- 1° Le moteur à air froid ;
- 2° Le moteur à air froid et injection d'eau froide ;
- 3° Le moteur à air chaud ;
- 4° Le moteur à air chaud et injection de vapeur d'eau.

Moteur à air froid. — Soit P_1 , la pression initiale de l'air dans le cylindre en atmosphères absolues ;

P_2 , la valeur de la contrepression ;

V_1 , le volume d'air admis.

Le travail développé par l'air se détendant suivant une adiabatique jusqu'à la valeur de la contrepression dans un cylindre sans espace nuisible, est donné par

$$\begin{aligned} T &= \frac{K}{K-1} P_1 V_1 \left(1 - \frac{P_1}{P_2}^{-\frac{K-1}{K}} \right) \\ &= 3,43902 P_1 V_1 \left(1 - \frac{P_1}{P_2}^{-0,29} \right) \end{aligned} \quad (4).$$

Pour un cylindre ayant un certain espace nuisible, le travail sera encore donné par la même équation, à condition que la compression soit complète dans l'espace nuisible, et que la détente soit poussée jusqu'à la valeur de la contrepression.

Dans ces conditions, en supposant que l'air fourni par la canalisation soit à une température de 15° centigrades ou $T_1 = 273 + 15 = 288^\circ$ absolus, le travail que nous pourrions recueillir par kilogramme d'air sera

$$\begin{aligned} T_1 &= 3,43902. R T_1 \left(1 - \frac{P_1}{P_2}^{-0,29} \right) \\ &= 28981 \left(1 - \frac{P_1}{P_2}^{-0,29} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Nous pourrions donc, au moyen de cette formule, calculer le nombre de kilogrammètres que peut fournir un kilogramme d'air comprimé et de là déduire le rendement

de transport. Mais il est beaucoup plus important pour nous de connaître la dépense d'air par cheval et par heure; ce chiffre nous permet également de trouver le rendement, et, de plus, étant donné le prix du mètre cube d'air, de calculer le prix du cheval utile vendu à l'abonné. Celui-ci paie l'air au mètre cube; le compteur est branché sur la canalisation, avant le moteur, et avant le réchauffeur s'il y en a. Il enregistre donc la quantité V_1 d'air comprimé admis à la pression P_1 , soit donc le produit $P_1 V_1$.

Nous supposons que l'air se détend isothermalement, la température restant à 15° , comme je l'ai admis. On aura donc $P_1 V_1 = P_2 V_2$, et c'est la valeur de V_2 par cheval et par heure que nous cherchons.

Remplaçons T dans l'équation (4) par le nombre de kilogrammètres produits par un cheval-heure, soit 270000; nous aurons

$$V_2 = \frac{270000}{3,43902 P_2 \left(1 - \frac{P_1^{-0,29}}{P_2}\right)} = \frac{7,6}{\left(1 - \frac{P_1^{-0,29}}{P_2}\right)}$$

L'air en se détendant se refroidit; si l'on connaît la température absolue de l'air à l'admission et le degré de détente, la température de l'air à l'échappement sera donnée par

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{-0,29}$$

Ainsi la température de l'air à l'admission étant $T_1 = 273 + 15 = 288$, la pression d'admission 5 atmosphères et la contrepression d'un $\frac{1}{10}$ d'atmosphère, la température à l'échappement sera de -103° .

A cause de cet abaissement de température excessif, les moteurs destinés à marcher à air froid doivent être construits d'une manière spéciale, car l'air fourni par la canalisation contient toujours beaucoup de vapeur d'eau, qui se change en neige. Pour que celle-ci ne donne lieu

à aucun inconvénient, l'aéromoteur devra remplir les trois conditions suivantes:

- 1° Avoir un tiroir de décharge séparé;
- 2° Avoir des conduites de décharge larges et courtes, pour que la neige soit facilement évacuée et ne puisse jamais obstruer les orifices;
- 3° Que la compression soit complète à fond de course pour fondre la neige qui reste dans le cylindre. Si ces trois conditions sont remplies, on pourra marcher à air froid aussi longtemps qu'on le voudra et sans le moindre inconvénient.

Pour des moteurs marchant d'une manière intermittente, la pratique enseigne qu'il n'y a pas besoin de prendre des précautions spéciales.

* * *

A la Bourse du Commerce, à Paris, se trouve installé un moteur à air froid de 100 chevaux, type vertical; ce moteur actionne deux dynamos Gramme de 500 volts, 75 ampères, destinées à la charge des batteries d'accumulateurs en tension.

Il existe deux moyens pour mesurer le nombre de mètres cubes d'air dépensé par cheval indiqué: on peut calculer la dépense d'air au moyen du diagramme, en tenant compte de la température de l'air à l'échappement et de la valeur de la contrepression; on peut encore utiliser un compteur d'air, qui n'est qu'un anémomètre gradué empiriquement.

Le moteur dont je viens de parler devait fournir 100 chevaux à la pression de 1 atmosphères; je n'ai pu faire des expériences que pour une puissance développée de 50 chevaux, la pression de l'admission étant de $3 \frac{1}{4}$ atmosphères; dans ces conditions et le nombre de mètres cubes dépensés par cheval indiqué de 22 à 23 m³, chiffre

obtenu par le calcul d'un diagramme. Pour la même marche, le compteur d'air donne 188 m³, moyenne obtenue dans cinq jours de marche. Quand l'aéromoteur marchait en produisant toute sa force, le compteur indiquait une dépense de 16,7 à 17 m³ d'air.

Ces chiffres s'éloignent-ils de la théorie? Remarquons que dans le moteur à air froid, la compression être complète dans l'espace nuisible, et que de plus nous poursuivrons la détente jusqu'à la valeur de la contrepression; puisque c'est du froid que nous voulons obtenir, nous devons faire la détente la plus longue possible. L'influence de l'espace nuisible disparaît donc, et nous pouvons calculer la dépense d'air comme si le cylindre n'avait pas d'espace nuisible, c'est-à-dire par les formules que nous avons établies plus haut.

Supposons que la perte de charge donnée par la canalisation soit successivement de $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$ 3 atm., la pression à l'admission sera par conséquent de 5, 5; 5.... 3 atm. Calculons quelle serait théoriquement la dépense d'air dans ces différents cas, la contrepression étant de $\frac{1}{10}$ d'atm., et le rendement mécanique de l'aéromoteur de 85%.

Tableau n° I.

Pression en atm.	Nombre de m ³ par cheval- heure indiqué	Nombre de m ³ par cheval- heure utile	Rendement de transport	Valeur de $\left(1 - \frac{P_1}{P_2} - 0,29\right)$
5.5	19	22.40	53	0.4
5	19.50	22.95	51	0.389
4.5	20.31	23.90	49	0.374
4	21.35	25.10	47	0.356
3.5	22.61	26.60	44	0.336
3	24.28	28.60	41	0.313

Une chose intéressante à remarquer, c'est le peu d'influence de la perte de pression due à la canalisation sur le rendement; ainsi avec une perte de $\frac{1}{2}$ atm., le rendement est de 53 %; si la perte est 6 fois plus forte, c'est-à-dire de 3 atm., le rendement de transport sera encore de 41 %.

Si nous nous reportons maintenant aux chiffres de consommation d'air trouvés pour le moteur de la Bourse, nous constaterons que les chiffres indiqués par le compteur d'air sont beaucoup plus faibles que ceux que donne la théorie. En réalité il doit en être ainsi, car l'inspection des diagrammes montre que la courbe de détente est un peu au dessus de l'adiabatique et il est facile d'en saisir la cause.

Les cylindres étant dégarnis, nous recevons de la chaleur de l'extérieur ; de plus l'eau qui se transforme en neige dans le cylindre abandonne un certain nombre de calories à l'air pendant la détente.

Les chiffres indiqués dans le tableau 1 se vérifieront donc en pratique.

Moteur à air froid et injection d'eau. — Jusqu'à présent nous avons supposé que la courbe de détente était l'adiabatique. Mais si dans l'air nous injectons en quantité suffisante de l'eau finement pulvérisée, celle-ci céderait de sa chaleur à l'air et la courbe de détente se rapprocherait de l'isothermale.

M. Cornet (Revue Universelle des Mines, (septembre et octobre 1878) a construit un moteur de ce genre qui a donné les résultats suivants :

Température de l'air à l'admission	21 $\frac{1}{2}$.
» » à l'échappement	5 $\frac{1}{2}$.
» l'eau à l'entrée	20 $\frac{1}{2}$.
» » à la sortie	14 $\frac{1}{2}$.

Pression de l'air 4.42 atm. absolues.

Le travail réellement indiqué aux cylindres de l'aéromoteur était les 0,946 du travail théorique, établi en admettant que la détente se fasse suivant la loi de Mariotte.

Pour arriver à ce résultat, on a dépensé 1,717 litre d'eau par m³ d'air.

Comme nous marchons à une pression un peu plus élevée que dans le cas que je viens de citer, nous pourrions

admettre, sans rien exagérer, que le diagramme réel, équivaut aux $\frac{9}{10}$ du diagramme théorique.

C'est d'après cette hypothèse que j'ai calculé le tableau suivant qui suppose, en outre, que la température de l'air fourni par la canalisation est de 15°.

Le travail que nous fournira l'air sera

$$T = 0.9 P_1 V_1 \log. \text{ nép. } \frac{P_1}{P_2} = 0.9 P_1 V_1 \log. \text{ nép. } \frac{P_1}{P_2}$$

Le nombre de m³ dépensés par cheval-heure indiqué sera de

$$V_2 = \frac{270.000}{0.9 P_2 \log. \text{ nép. } \frac{P_1}{P_2}} = \frac{12.60}{\log. \frac{P_1}{P_2}}$$

Tableau n° II.

Pression en atmosphères	Nombre de m ³ par cheval-heure indiqué	Nombre de m ³ par cheval-heure utile	Rendement de transport
5.5	16.33	19.21	61
5	17.11	20.13	58
4.5	18.10	21.30	55
4	19.18	22.56	52
3.5	20.60	24.23	48
3	21.46	26.42	44

Pendant la marche ordinaire à air froid, nous avons toujours en réalité de l'eau dans l'air, et les chiffres de consommation d'air pourraient se rapprocher de ceux indiqués dans ce tableau. Ainsi, pour la marche à air froid, nous avons dit que le compteur avait indiqué des dépenses de 16.7 à 17 m³ par cheval-heure indiqué, pour une pression de 4 atm., alors que la température de l'air à l'échappement variait entre 50° et 60°. Les chiffres du compteur sont évidemment beaucoup trop faibles. La pulvérisation de l'eau n'est pas difficile à réaliser ; il faut avant tout nécessairement viser à la simplicité, et il ne peut être question de se servir de pompe foulante, à moins d'avoir un moteur d'une certaine puissance. Il est plus simple, pour des moteurs de faible puissance et tournant

en général à un nombre de tours assez grand, de créer entre la canalisation et la chapelle de distribution une différence de pression, soit au moyen d'un détendeur qui peut être simplement la vanne de commande du moteur et de se servir de cette différence de pression, pour injecter dans l'air l'eau contenue dans un réservoir.

Les pulvérisateurs se trouvent dans la chapelle de distribution ou dans le cylindre.

Si l'eau injectée n'était pas en quantité suffisante, il se formerait de la neige ; l'aéromoteur devra donc être construit comme un moteur à air froid. Un thermomètre placé sur l'échappement nous permettra de régler l'injection.

Moteur à air chaud. — Nous avons dit qu'on pouvait parfaitement marcher avec de l'air froid ; si donc nous chauffons l'air avant son entrée dans le cylindre, c'est que nous y trouvons bénéfice.

Pour l'air chaud, comme pour l'air froid, deux cas peuvent se présenter suivant que la courbe de détente est supposée être une adiabatique ou une isothermale.

Occupons-nous d'abord du moteur adiabatique à air chaud, c'est-à-dire celui qu'on aurait en employant de l'air sec.

La formule donnant le travail est

$$T = 3,43902 \, R T_2 \left(1 - \frac{P_1}{P_2}^{-0.29} \right)$$

Soit T^0 , la température absolue à laquelle on chauffe l'air avant son entrée dans le cylindre et T_2 la température de l'air fourni par la canalisation.

Le travail que pourrait rendre un kilog. d'air à T_2 (cas du moteur à air froid) est

$$T' = 3,43902 \, R T_2 \left(1 - \frac{P_1}{P_2}^{-0.29} \right)$$

Si nous chauffons l'air à T_1° , le travail serait :

$$T' = 3,43902 R T_1 \left(1 - \frac{P_1^{-0,29}}{P_2} \right)$$

d'où $T' = \frac{T_1}{T_2} T$; le rendement de transport à air chaud serait donc $\frac{T_1}{T_2}$ fois plus grand que celui obtenu pour l'air froid.

Si on chauffe l'air successivement à 150° , 200° , 250° , 300° , les rendements de transport seront successivement 1.46, 1.64, 1.81, 1.99 fois plus grand que pour l'air froid.

Développons les résultats que l'on obtient en chauffant à 150° .

Tableau n° III.

Pression en atmosphères	Nombre de m ³ par cheval- heure indiqué	Nombre de m ³ par cheval- heure utile	Rendement de transport	Coke nécessaire au réchauffage de l'air
5.5	12.93	15.20	78 %	102 gram.
5	13.29	15.65	76 %	106 "
4.5	13.89	16.35	73 %	110 "
4	14.53	17.10	70 %	115 "
3.5	15.40	18.10	66 %	122 "
3	16.53	19.50	61 %	131 "

Réchauffeurs d'air. — Avant son entrée dans le cylindre, l'air passe dans un réchauffeur. A Paris, celui-ci consiste en un serpentín vertical, disposé circulairement ; au centre se trouve un feu de coke ; l'appareil a ainsi la forme d'un poêle, et occupe peu de place. Un kilog. de coke peut dégager 7400 calories. (Aide-mémoire de l'ingénieur page 894).

M. Riedler trouve que les anciens réchauffeurs faits en fonte, utilisaient pour le chauffage de l'air 4470 à 4530 calories, ce qui donne un rendement calorifique de 60,5 à 61,2 %. Les nouveaux réchauffeurs, où le serpentín est constitué de tuyaux de fer étiré, utiliseraient 5600 calories, soit un rendement calorifique de $\frac{5600}{7400} = 75.7 \%$.

Admettons le chiffre de 5000 pour tenir compte des erreurs que donnent les compteurs d'air ; c'est d'après ce chiffre que j'ai calculé la dernière colonne du tableau.

Pour le moteur à air froid, on était certain que l'expérience confirmerait des chiffres donnés par la théorie ; avec de l'air chaud, il faut nécessairement compter sur une certaine perte provenant du refroidissement dû aux parois du cylindre. Mais d'un autre côté l'air étant toujours plus ou moins chargé de vapeur d'eau, celle-ci abandonnera de sa chaleur pendant la détente, et, si elle est en quantité suffisante, elle compensera la perte due au rayonnement.

Les chiffres trouvés par différents expérimentateurs pour le rendement d'un transport de force par l'air comprimé sont tellement différents les uns des autres, qu'il importe d'en rechercher la cause. Dans son travail, M. Riedler nous donne de nombreux diagrammes tirés sur des compresseurs et aéromoteurs existants, et qui sont tellement défectueux qu'il n'y a rien d'étonnant de voir qu'on ait quelquefois trouvé des rendements de 10 à 15 %. C'est le cas des premiers essais faits à Paris, où on employait comme aéromoteurs des machines à vapeur ; on peut bien dans ce cas marcher à air chaud sans rien changer à la distribution ; mais il est bien évident que pour avoir un aéromoteur économique, il faut une machine à vapeur ayant une détente assez prolongée.

Ainsi les anciens moteurs à rotation n'avaient pas de détente ; le type d'un demi-cheval dépensait 66 m³ par cheval utile, et le type d'un cheval 55 m³ en marchant à air froid. Actuellement les moteurs à rotation marchent à détente : le type d'un cheval dépense 40 m³ à froid et 27 m³ en chauffant l'air à 70°.

Pour les moteurs de 1 et de 2 chevaux à un cylindre marchant avec de l'air chauffé à 150°, on est arrivé à des consommations de 20 à 24 m³ par cheval-utile. Ce sont de beaux résultats déjà, mais il peuvent encore être améliorés.

Ainsi un des moteurs essayés (moteur Journaux d'une

force de 2 chevaux) dépensait 19.7 m³ par cheval-frein, mais le travail absorbé par les frottements était de 25 à 35 %. Si nous nous tenons au premier de ces chiffres (25 %), on aurait dépensé par cheval-indiqué et par heure 14.75 m³.

Il faut donc diminuer les pertes par frottement, et trouver un type de moteur qui réponde en même temps à toutes les exigences de la pratique. Le meilleur serait, je crois, le moteur à grande vitesse et à simple effet, où tout le mécanisme en mouvement est renfermé et plonge dans un bain d'eau et d'huile ; le graissage est alors excellent, les frais d'huile et de chiffons réduits au minimum ; le moteur ne fait pas de bruit, tient peu de place, et ne demande pas de surveillance, conditions essentielles à remplir pour des moteurs qui doivent être mis dans des maisons particulières et confiés à des personnes inexpérimentées. Nous n'avons encore parlé que des petits moteurs de 1 et de 2 chevaux; passons aux moteurs de plus grande force. En faisant marcher une machine à vapeur Farcot à un cylindre sans y apporter aucune modification, M. Riedler trouve les chiffres suivants :

TEMPÉRATURE DE L'AIR		Nombre de m ³ par cheval-heure indiqué	Rendement de transport
Admission	Échappement		
129°	21°	13.29	76 %
15°	29°	12.38	81 %
160°	35°	12.02	84 %

La consommation de coke par cheval était de 90 grammes, et la pression de l'air 5 atm. Le calcul nous avait donné (tableau 3) pour une température de 150° et une pression de 5 atm., une dépense de 13.29 m³ par cheval indiqué. M. Riedler trouve moins encore, c'est-à-dire 12.38 m³. Cela tient sans doute à la vapeur d'eau contenue en assez grande quantité dans l'air, car cette machine se trouvait à l'usine même, où l'air dans les réservoirs est à une température de 50°, et sursaturé

de vapeur d'eau. En ville, la quantité d'eau contenue dans l'air est moins forte, et on arrive, avec les moteurs actuels, à une moyenne de 14 m^3 par cheval indiqué, soit un rendement de transport de 72 % : si le rendement mécanique était de 90 %, on dépenserait 15.55 m^3 par cheval utile ; ces moteurs n'ont pas, en règle générale, une détente assez prolongée. Nous pouvons donc admettre que les chiffres donnés dans le tableau 3, se vérifieront dans la pratique, soit que la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air soit suffisante, soit qu'on chauffe l'air un peu au delà de 150° , ce qui ne fera qu'augmenter de fort peu la quantité de coke nécessaire au réchauffage ; celle-ci a du reste été évaluée un peu au dessus de la valeur que les résultats trouvés par M. Riedler permettaient de le faire.

Les réchauffeurs ordinaires donnent une température de 150° à 200° ; mais en installant deux de ces réchauffeurs en série, on pourrait porter la température de l'air à 230° et même à 300° ; il y aurait évidemment économie à marcher à des températures élevées comme le propose M. Riedler, mais que deviennent les bourrages, et surtout le graissage des tiroirs et des cylindres à ces températures ?

En règle générale, est-il toujours économique de chauffer l'air ? Distinguons ici deux cas qui demandent une manière différente de discuter cette question.

Ainsi l'usine peut être montée par une compagnie qui n'emploie l'air qu'elle produit que pour ses besoins personnels ; ou bien l'air sera vendu à des abonnés qui le payent au mètre cube.

Dans le premier cas, c'est-à-dire quand l'air comprimé ne sert qu'à celui qui le produit, il faut voir s'il n'y aurait pas économie à brûler le coke ou le charbon employé au réchauffage de l'air sur les grilles des chaudières de l'usine, et de n'employer que la détente à air froid. Aux essais officiels de réception des compresseurs Dubois et François, on a constaté qu'avec un bon vide au

conducteur, le cheval vapeur indiqué était obtenu avec 770 grammes de charbon pur (cendres déduites), ou 830 grammes de charbon brut. En admettant que la perte de charge due à la canalisation soit de 1 atm., on trouverait que le coke employé au réchauffage de l'air, produirait, s'il était brûlé sur les grilles des chaudières de l'usine, 1,2 m³ d'air. Nous dépenserions par cheval utile, dans un bon aéromoteur, 22.95 m³ en marchant à air froid et 15.65 m³ en marchant à air chaud, soit donc une diminution de 7,30 m³ produite par le réchauffage de l'air, alors qu'en brûlant le coke à l'usine nous ne gagnons que 1,2 m³. Il y a donc économie à chauffer l'air.

Dans le second cas, il s'agit de voir si l'abonné a intérêt à chauffer l'air : le calcul est plus facile. La perte de charge due à la canalisation étant d'une atmosphère, établissons les prix du cheval utile à air froid et à air chaud, pour différents prix du m³ d'air, et prenons 3 centimes comme prix moyen du kilog. de coke, nous trouvons :

Prix du m ³ d'air	Moteur à air froid	Moteur à air chaud	Différence
1 5	34.50 cent.	23.77 cent.	10.73 cent.
1.15	28 70 "	19.87 "	8.83 "
1	22.95 "	15.97 "	6.98 "
0.75	17.20 "	12.07 "	5.13 "
0.5	11.43 "	8.14 "	3.34 "

Ainsi il y a bénéfice pour l'abonné à employer l'air chaud, et ce bénéfice est d'autant plus sensible que le prix du m³ est plus élevé.

Une machine à vapeur quelconque peut marcher à air chaud. Cependant il serait préférable que les aéromoteurs fussent tous du même type que les moteurs à air froid, car nous devons pouvoir marcher à air froid dans le cas où le réchauffeur demanderait à être réparé. Il arrive encore que l'abonné veuille marcher à air froid pendant un certain nombre d'heures de la journée pour fabriquer une certaine quantité de glace, pour reprendre ensuite la marche plus

économique à l'air chaud. En règle générale, du reste, nous n'allumerons le feu dans le réchauffeur qu'une fois la machine mise en marche ; pendant un certain temps, elle marchera donc à air froid. Pour toutes ces raisons, on peut donc dire qu'il serait désirable que tous les aéromoteurs fussent construits comme des moteurs à air froid.

Fabrication de la glace. — Puisqu'en marchant à air chaud, l'abonné y trouve un bénéfice, s'il emploie l'air froid c'est que la marche de ses moteurs est intermittente, ou qu'il désire utiliser l'air froid, soit pour produire de la glace, soit pour refroidir des locaux.

Si nous nous tenons au cas pratique de la marche à 5 atm., on peut calculer que par cheval utile, nous obtiendrions environ 8 kilog. de glace ; en pratique on compte généralement sur 5 kilog.

Si un abonné possède chez lui, un moteur à air destiné par exemple à activer une dynamo, il peut, soit marcher à air chaud, soit marcher à air froid et produire 5 kilog. de glace par cheval et par heure. Si le m³ d'air vaut 1.5 cent., nous avons vu qu'il y avait une différence de 10.73 cent., entre le prix du cheval à froid et à chaud ; le kilog. de glace coûtera donc à l'abonné $\frac{10.73}{5} = 7,15$ cent.

On peut de cette manière calculer le prix du kilog. de glace dans différents cas.

Prix du m ³ d'air,	cent.	1.50,	1.25,	1,	0.75	0.50
Prix du kilog. de glace,	»	2.15,	1.77,	1.39	1.03	0.67

Il se peut qu'un abonné ait avantage à marcher à air froid en utilisant la décharge pour faire de la glace. Ainsi à Paris où le m³ d'air coûte 1.5 cent., le kilog. de glace revient à l'abonné 2,15 cent., s'il la fabrique lui-même, tandis que s'il l'achète, elle lui coûte 5 cent. le kilog.

Mais dans certains cas où il faudrait pouvoir produire du froid, on n'a pas de travail à réclamer à un aéromoteur. On ne pourrait songer à mettre un frein et perdre ainsi

inutilement de l'énergie ; il fallait trouver autre chose. M. J. François a résolu très élégamment la question. Son moteur a 2 cylindres ; le premier reçoit l'air comprimé qui s'y détend et se refroidit en produisant du travail. Le second cylindre est un compresseur qui refoule de l'air comprimé dans la conduite. Nous produisons donc du froid, et quant à la dépense l'abonné ne paiera naturellement que la différence entre la quantité d'air prise à la conduite par le cylindre détendeur et la quantité d'air rendue à la conduite par le cylindre compresseur.

Un moteur de ce genre devant se placer dans les habitations particulières, doit occuper naturellement le moins d'espace possible, c'est-à-dire marcher à un nombre de tours assez élevé ; en conséquence la compression de l'air sera adiabatique.

Cherchons le coût du kilogramme de glace, la pression de l'air étant de 5 atmosphères.

Si le compresseur est bien proportionné, nous pouvons compter qu'un cheval indiqué au cylindre refoulera 8 m^3 d'air dans la conduite. Or, un cheval indiqué au cylindre demande une dépense de $19,50 \text{ m}^3$; l'abonné payera donc $19,50 - 8 = 11,50 \text{ m}^3$, et pourra avec cela faire $5 \times 0,85 = 4,25$ kilogs. de glace, puisque par cheval utile on produit 5 kilog. et que le rendement mécanique des aéro-moteurs a été supposé être de 85 %.

Un kilog. de glace demanderait donc une dépense de $\frac{11,50}{4,25} = 2,70 \text{ m}^3$ d'air.

Dans ces conditions, la fabrication de la glace ne se fera pas, car d'autres systèmes nous permettent d'obtenir le kilog. à moins d'un centime.

Ce genre de moteur à froid trouvera son emploi pour le refroidissement des chambres destinées à la conservation des viandes, comme on commence à en établir dans les halles, ou bien encore dans les pays chauds, pour refroidir les habitations, si naturellement le prix du mètre cube n'est pas trop élevé.

Moteurs compound à air chaud. — Nous n'avons parlé jusqu'à présent que du moteur à air chaud tel qu'on le rencontre à Paris, mais on se propose actuellement de le modifier et de marcher avec des moteurs compound.

Supposons que nous chauffions l'air à 150° , avant son entrée dans le premier cylindre ; à la sortie de celui-ci l'air passera dans un second réchauffeur qui reportera la température à 150° , puis de là se détendra finalement dans le deuxième cylindre.

Il en résultera évidemment une diminution de la dépense d'air, et une augmentation dans la consommation du coke nécessaire au chauffage.

D'après M. Riedler, on pourrait à ne plus dépenser que $9,5 \text{ m}^3$ d'air par cheval indiqué en chauffant l'air à 200° , ce qui donnerait un rendement de transport de 106% . Mais outre les difficultés pratiques, on oublie le vrai but de la distribution de force ; ce n'est pas des moteurs puissants que nous avons à nous occuper, mais des petits moteurs, et on doit avant tout viser à la simplicité et à occuper un espace restreint.

Moteurs à air chaud et à injection de vapeur d'eau. — Si nous injectons de la vapeur d'eau dans l'air chaud, la courbe de détente se rapprocherait de l'isothermale, et la consommation d'air par cheval diminuerait. On a beaucoup parlé de cette classe de moteurs et somme toute on ne sait rien de précis à leur égard. Qu'il y ait une économie dans la dépense d'air, en marchant de cette manière, cela est bien prouvé ; mais de combien est-elle, quel est le nombre de grammes de coke à brûler, et de litres d'eau à vaporiser pour arriver à un résultat déterminé, on n'en sait rien.

M. Radinger a trouvé, en marchant à air chaud, une dépense de 19.3 m^3 par cheval indiqué, en injectant de la vapeur d'eau, la dépense était réduite à 14.8 m^3 . Ainsi l'injection de vapeur donnait une économie de $4,5 \text{ m}^3$ par cheval-heure sur la marche à air chaud et, dans les deux cas, la température était la même, soit de 170° . Pour

arriver à ce résultat, on a dépensé 4 litres d'eau, et 0.3 kilog. de coke par cheval-utile et par heure. Remarquons qu'ici toute l'eau n'a pas été convertie en vapeur, sinon on eût vaporisé 13,33 kilog. d'eau par kilog. de coke, et en outre chauffé 16 m³ d'air à 170°. Mais est-il bien économique d'employer quatre litres d'eau par cheval-heure ? M. Proell⁽¹⁾, recherche théoriquement quelle doit être la quantité d'eau à employer et quel sera le nombre de m³ d'air dépensés par cheval-heure dans ces conditions. Ainsi avec un moteur marchant à 6 atm., on dépenserait théoriquement 9 m³ d'air et 0.884 kilog. d'eau ; en admettant 45 % pour les pertes dues à la condensation de l'eau sur les parois du cylindre, la dépense d'air serait de 60,35 par cheval indiqué, et cela en ajoutant environ 1 litre d'eau. Mais ces calculs demandent une confirmation pratique ; il en est de même de ceux de M. Ridler. Comme limites pratiques pouvant être atteintes avec une machine compound, la température de l'air étant 200°, on aurait d'après lui, en injectant 1 litre d'eau, une dépense de 73 m³, soit un rendement de **138** %, et avec 2 litres d'eau 6 m³, soit un rendement de **168** %. Aucune expérience n'a permis d'espérer de si beaux résultats ; il faut d'ailleurs se demander si tout cela est bien pratique, et considérer qu'on aura à la fois un moteur, deux réchauffeurs, puis encore une injection de vapeur consécutive ; évidemment c'est trop compliqué pour de petits moteurs ; quant aux grands, il est inutile des'en occuper, car le plus économique de tous sera toujours la machine à vapeur elle-même et ces injections d'eau de 1 à 2 litres, qui dans la pratique seront certainement beaucoup plus fortes pour arriver aux résultats annoncés, nous ramènent en somme à la machine à vapeur.

Il faut voir en outre si, étant donné le coke nécessaire au réchauffage de l'air et à la vaporisation de l'eau, quantité

(1) Zeitschrift des vereines deutscher ingenieur, n° du 7 mars 1891.

qui sera assez importante, nous aurions même intérêt à employer ce genre de moteurs, plutôt que de nous en tenir à de simples moteurs à air chaud. En règle générale même pour ces derniers, il est bon que l'air soit humide ; cela nous donnera une certaine condensation dans le cylindre qui favorisera son graissage et en même temps diminuera un peu la dépense. Nous injecterons donc dans l'air avant son entrée dans le réchauffeur une petite quantité d'eau ; nous avons vu qu'il était facile de réaliser cela sans complication. L'expérience nous apprendra le gain que nous en retirerons et la meilleure manière de régler cette injection.

En pratique à Paris, cette marche à injection de vapeur n'est que l'exception ; le moteur à air chaud est le seul employé d'une manière courante. Si on se base sur les chiffres des compteurs d'air, on aurait en moyenne une dépense de 11,5 à 12,5 m³ d'air par cheval indiqué pour la marche à injection de vapeur, soit un rendement de de transport de 87 à 80 %.

Mais j'ai eu l'occasion déjà de donner, pour le moteur à air froid, des chiffres montrant le peu de confiance qu'on doit avoir dans les indications des compteurs employés à Paris. D'autre part, on n'a jamais pu avoir de données certaines sur les quantités d'eau, ou de coke employés ; au réchauffage, M. Riedler dans son travail, n'apporte aucun résultat d'expérience sur cette classe de moteurs, qu'il doit avoir expérimentés.

Canalisation. — Occupons-nous maintenant du calcul de la perte de charge due à une canalisation d'une longueur connue.

Les expériences faites par M. Stockalper au St-Gothard ont montré que la formule, qui concordait le mieux avec les résultats observés, était celle que Darcy avait établie pour la résistance de l'eau dans les conduites.

Soit L , la longueur de la conduite en mètres.

D, le diamètre de la conduite, I, la perte de charge par mètre courant.

b , un coefficient à fixer par expériences.

v , la vitesse d'écoulement de l'air en mètres par seconde, vitesse que nous supposons constante.

γ , la densité de l'air comprimé (poids du m^3) à l'origine de la conduite.

Pour les conduites d'eau Darcy pose :

$$I = \frac{2 b v^2}{D} ; \text{ avec } b = 0,000507 + \frac{0,00001294}{D}$$

Remplaçons v^2 en fonction du volume Q d'air s'écoulant par seconde.

$$\text{On a } I = \frac{32 b Q^2}{\pi^2 D^5} = 3.2423 \frac{b}{D^5} Q^2 \quad (6)$$

Cette équation nous montre que la résistance des conduites varie en raison inverse de la 5^e puissance du diamètre.

De l'équation (6) on tire :

$$\frac{I}{Q^2} = 3.2423 \frac{b_1}{D^5}$$

quantité qui n'est fonction que du diamètre ; Darcy a calculé les valeurs de $\frac{I}{Q^2}$ pour les différents diamètres, ce qui facilite beaucoup les calculs. Désignons par h , la perte totale d'une canalisation d'eau de L mètres de longueur, on a

$$h = I L = \left(\frac{I}{Q^2} \right) Q^2 L$$

Pour avoir la perte de charge dans le cas de transmission d'air, il suffit de multiplier le second membre de l'équation par γ . La perte de charge h sera alors exprimée en kilog. par mètre carré.

Voici le tableau des valeurs de $\frac{I}{Q^2}$ pour différents diamètres.

Diamètre en mètre	Valeur de $\frac{I}{Q^2}$	Diamètre en mètre	Valeur de $\frac{I}{Q^2}$	Diamètre en mètre	Valeur de $\frac{I}{Q^2}$
0.050	7945.5	0.125	64.847	0.400	0.17075
0.055	4711.2	0.150	25.326	0.425	0.12565
0.060	3012.8	0.175	11.473	0.450	0.09412
0.065	1972.7	0.200	5.791	0.475	0.07162
0.070	1334.4	0.225	3.173	0.500	0.05528
0.075	928.31	0.250	1.8548	0.550	0.03417
0.080	661.65	0.275	1.1419	0.600	0.02203
0.085	481.60	0.300	0.7339	0.650	0.01472
0.090	357.26	0.325	0.4889	0.700	0.010135
0.095	269.45	0.350	0.3357	0.750	0.007161
0.100	206.127	0.375	0.2367	0.800	0.005175

Voyons si les résultats d'expérience cadrent bien avec les chiffres calculés par la formule de Darcy.

Au mont Cenis on avait les données suivantes :

$Q = 0^m3,4241$; $D = 0^m,80$; $L = 1000^m$; $\gamma = 7^{kg},764$;
la valeur de $\frac{I}{Q^2}$ pour un tuyau de 300 m/m de diamètre
est 0.7339.

La perte de charge serait donc :

$h = 0.7339 (0.4241)^2 1000 7,764 = 1025$ kilog. par m^2 .
L'expérience a donné 1060,5.

Ici le chiffre calculé est sensiblement égal au résultat observé, et il est même un peu plus faible.

Au St-Gothard les résultats observés ne concordent plus aussi bien avec la formule de Darcy. Nous avons supposé que l'on admettait dans celle-ci que la vitesse et la densité de l'air restaient constantes, mais ce n'est vrai que pour une conduite de faible longueur, donnant lieu à faibles pertes de charge. En général on se sert de la vitesse moyenne et de la densité moyenne ; c'est-à-dire que si P_1 est la pression à l'origine et P_2 la pression à la fin de la

conduite, on calcule la perte de charge, en admettant une pression moyenne de $P = \frac{P_1 + P_2}{2}$, et la vitesse moyenne de l'air est calculée en se servant de cette pression P : c'est ainsi que M. Stockalper emploie la formule de Darcy.

Il a expérimenté sur une conduite de 0^m,200 de diamètre et 4600 m. de longueur, et cherché les pertes de charge pour différentes vitesses d'écoulement de l'air.

Vitesse d'écoulement en mètres par seconde	PERTE DE CHARGE		Rapport
	Observée	Calculée	
5.00	0.36 atm.	0.57 atm.	1.585
4.97	0.22 "	0.32 "	1.45
4.75	0.19 "	0.25 "	1.33

Avec une autre conduite de 0^m,15 de diamètre et de 522 mètres de longueur, on obtint les résultats suivants :

Vitesse d'écoulement en mètres par seconde	PERTE DE CHARGE		Rapport
	Observée	Calculée	
11.35	0.24 atm.	0.30 atm.	1.25
9	0.105 "	0.135 "	1.285

Le chiffre calculé a donc toujours été plus fort que le chiffre observé.

A Paris on a fait une série d'expériences sur les pertes de charge éprouvées avec une conduite de 0^m,300 de diamètre et d'une longueur totale de 16502 mètres. Cette conduite présente naturellement de nombreux coudes ; on y trouve en outre des siphons, des purgeurs, des vannes, et enfin des réservoirs. La résistance que ces derniers offrent au passage de l'air est assez considérable ; ainsi un seul d'entre eux donnerait lieu à une perte de charge de 0.15 atm., la vitesse de l'air étant 7 mètres ; avec une vitesse de 9 mètres, la perte de charge atteindrait 0,2 atm.,

Dans certains cas, 5 de ces réservoirs suffiraient pour donner une perte de charge d'une atmosphère.

Donnons les résultats obtenus par M. Riedler et calculons comme comparaison pour chaque cas, le chiffre que donnerait l'application de la formule de Darcy.

Longueur de la conduite	Pression en atmosphères effectives		Vitesse moyenne de l'air	Perte de charge		Rapport
	Origine	Fin		Observée	Calculée	
16502 m.	6.25	4.25	8.67 m.	2.	3.31	1.655
	6.78	4.36	8.24 "	2.42	3.03	1.25
	7.125	5.84	5.83 "	1.285	1.785	1.39
	6.9	6.28	4.1 "	0.62	0.902	1.45
	6.78	6.4	3.4 "	0.38	0.62	1.63
4403 m.	6.78	6.17	7.3 "	0.61	0.747	1.225
	7.125	6.7	5.53 "	0.425	0.453	1.065
	6.9	6.6	5.09 "	0.3	0.378	1.26
	6.37	6.2	4.9 "	0.17	0.329	1.935
	6.75	6.5	4.42 "	0.25	0.280	1.12
	7.125	6.95	2.8 "	0.175	0.119	0.69
	6.	5.84	6.32 "	0.16	0.394	2.46
3340 m.	6.33	6.29	4.32 "	0.04	0.195	4.87

La dernière colonne donne les rapports entre les chiffres calculés et les chiffres observés. On voit qu'en général les chiffres calculés sont plus forts que les chiffres observés (dans un seul cas, le résultat du calcul est beaucoup plus faible que celui de l'observation); le rapport des premiers aux seconds varie de 1 à 5. Les deux dernières séries de chiffres se rapportant à une conduite qui ne contient pas de réservoir, ce sont ceux-là qui doivent nous renseigner sur la valeur réelle de la résistance de l'air dans une conduite de 300; le premier chiffre observé est 2,46 fois plus faible que le chiffre calculé et pour la deuxième il est 4,87 fois plus faible.

M. Riedler en conclut qu'une conduite de 300 m/m de diamètre, donnera par kilomètre une perte de charge de 0,05 atm., la vitesse moyenne de l'air étant 6m,50 par seconde.

La résistance des conduites d'air serait exprimée assez bien d'après lui par la formule

$$h = 0,000533 \gamma \frac{L}{D} v^2$$

h étant la perte de charge en kilog. par mètre carré ;

L la longueur de la conduite en mètre ;

D le diamètre en mètre ;

v la vitesse moyenne de l'air en mètres par second ;

γ densité de l'air (poids du m³ d'air comprimé).

Comparons cette formule avec celle de Darcy

$$h = \left(\frac{1}{Q^2} \right) Q^2 L \gamma = 1 L \gamma = \frac{2 b L \gamma v^2}{D},$$

on voit que les deux formules ne diffèrent que par leur coefficient ; celui de Darcy est

$$2 b = 2 \left(0,000507 + \frac{0,00001294}{D} \right),$$

soit approximativement deux fois le terme 0,000533 de la formule de M. Riedler (1). Ainsi donc, d'après ce dernier, les résultats calculés par la formule de Darcy seraient deux fois trop forts.

Mais je ne crois pas malgré les expériences de Paris, que nous devons admettre la formule de M. Riedler comme suffisamment établie.

Au Mont-Cenis, il n'y avait pas de réservoirs intercalés dans la conduite qui était à jour et les fuites d'air y étaient insignifiantes ; de plus, de vastes réservoirs installés à l'origine de la conduite maintenaient la pression toujours constante. Or, nous avons trouvé une concordance parfaite entre le chiffre calculé en partant de la formule de Darcy et le résultat d'expérience, et cependant, il convient de le remarquer, le diamètre de la conduite était de

(1) Voir Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure n° du 14 février 1891, page 1188 La formule est donnée pour D exprimé en cm ; il y a là évidemment une erreur ; D doit être exprimé en mètres.

300^m/m, tout comme à Paris, et la vitesse d'écoulement de l'air était, dans l'expérience que j'ai citée, de 6 mètres par seconde.

Au St-Gothard, à la vérité, la formule ne se vérifiait pas aussi bien; les pertes de charges calculées étaient toujours plus fortes que les pertes de charges observées; mais la différence la plus forte n'a été que de 50 %.

A Paris, nous trouvons entre les pertes de charge calculées et les pertes de charge observées, des différences considérables. Ainsi, pour le dernier chiffre du tableau donné plus haut, la perte de charge calculée serait près de cinq fois trop forte. Du reste, à Paris, il ne peut pas être question de faire des expériences précises, et tant que d'autres expériences, faites dans des conditions moins complexes, ne seront pas venues confirmer la formule de M. Riedler, je crois qu'il est prudent de s'en tenir à la formule de Darcy; peut-être nos diamètres de conduite, ainsi calculés, seront un peu trop forts, mais au moins nous serons sûrs de ne pas dépasser la perte de charge que nous consentirons.

Dans la formule de Darcy, nous avons dit qu'on ne peut considérer la vitesse et la densité comme constantes que pour de très-faibles longueurs de conduites; si ces longueurs sont assez grandes, il convient de calculer la densité et la vitesse par rapport à la pression moyenne donnée par $\gamma = \frac{P_1 + P_2}{2}$, où P_1 est la pression à l'origine de la conduite; P_2 la pression à la fin.

Mais pour connaître la pression moyenne, il faut que nous connaissions P_1 et P_2 . Or, le problème à résoudre se pose en pratique comme suit: Déterminer quelle est la perte de charge donnée par une conduite dont le diamètre est D mètres et la longueur L mètres, la pression, la densité et la vitesse de l'air à l'origine de la conduite étant connues.

Pour résoudre ce problème, il faut modifier la formule de Darcy, de manière à ne plus y laisser que les quantités données.

M. H. Dechamps nous donne cette formule (1):

$$h = \frac{\alpha \pi l v^2 L}{1 + \frac{\alpha \pi l}{2} v^2 L} P_1$$

Dans cette formule, P_1 est la pression en atmosphères absolues à l'origine de la conduite.

$$\alpha = \frac{2 b}{10333 D} = \frac{2 \left(0,000507 + \frac{0,00001294}{D} \right)}{10333 D}$$

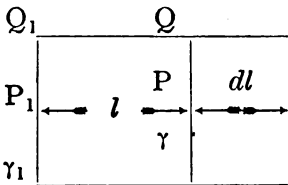
πl est le poids du mètre cube à la pression atmosphérique moyenne et à la température l .

L , est la longueur de la conduite exprimée en mètres.

v , la vitesse de l'air en mètres.

h , la perte de charge en atmosphères.

M. Kraft (2) a également cherché à modifier la formule de Darcy pour en permettre l'application sans tenir compte de la pression moyenne.



Pour une longueur infiniment petite dl , la perte de charge sera $dp = -A Q^2 \gamma dl$.

A , étant le terme $\frac{1}{Q^2}$ inscrit dans la table de Darcy.

$$\text{On a } Q_1 P_1 = Q P, \text{ d'où } Q = \frac{Q_1 P_1}{P}.$$

(1) Voir Revue Universelle des mines, V^e série, tome VIII, page 300.

(2) Je dois cette formule ainsi que beaucoup d'autres renseignements contenus dans ce travail à l'obligeance de M. Kraft, ingénieur en chef à la Société Cockerill, dont les conseils éclairés m'ont beaucoup servi dans la confection de ce travail, et à qui je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance.

$$\gamma = \gamma_1 \frac{P}{P_1}, \quad \text{d'où}$$

$$d p = - A Q_1^2 \frac{P_1}{P^2} \gamma_1 d l$$

$$p d p = - A Q_1^2 P_1 \gamma_1 d l$$

$$\gamma \frac{P^2}{2} = - A Q_1^2 P_1 \gamma_1 l + \text{constante}$$

$$\text{Or pour } l = 0. P = P_1 \text{ d'où } \text{constante} = \frac{P_1^2}{2}$$

$$\frac{P^2}{2} = \frac{P_1^2}{2} - A Q_1^2 P_1 \gamma_1 l$$

$$\text{d'où } P = P_1 \sqrt{1 - 2 A Q_1^2 \frac{\gamma_1}{P_1} l}$$

Nous aurons donc pour la perte de charge

$$L = P_1 - P = P_1 \left(1 - \sqrt{1 - 2 A Q_1^2 \frac{\gamma_1}{P_1} l} \right)$$

Appliquons maintenant ces formules à un cas bien déterminé: proposons-nous, par exemple, de chercher le diamètre de conduite à adopter pour transporter à 5000 mètres de distance l'air fourni par une usine d'une puissance de 5000 chevaux-vapeur indiqués.

Si nous distribuons l'air à l'intérieur d'une ville, nous aurons au moins deux conduites partant de l'usine. Nous avons dit que la résistance des conduites variait en raison inverse de la 5^e puissance de leur diamètre; nous en tirons cette conclusion importante que le transport par l'air comprimé sera plus économique pour de grandes forces que pour de petites; en conséquence aussi, nous aurons toujours avantage à employer, quand nous le pourrons, une seule conduite. Si, par exemple, nous amenons l'air comprimé à une ville située à plusieurs kilomètres du compresseur, ce principe nous conduirait à n'employer qu'une seule conduite. Mais alors la moindre réparation nous forcerait à arrêter toute l'usine. Il vaudrait donc mieux, en somme, avoir deux conduites dont une grande

et une petite, celle-ci n'ayant d'autre but que de nous permettre de faire les réparations nécessaires à la conduite principale, pendant les heures de la journée où la demande est faible, la nuit par exemple, ou bien encore pendant la journée du dimanche.

La détermination du diamètre convenable à donner à la conduite, est presque toujours une question de tâtonnements ; quelquefois on s'impose la perte de charge et le problème s'en trouve simplifié ; mais ce qu'il faudrait c'est déterminer la conduite qui rend minimum le prix de revient du cheval utile fourni à l'abonné et cela on n'y arrive qu'en tâtonnant. Pour faciliter cette recherche ainsi que pour calculer en même temps la perte d'énergie due à la canalisation, nous allons déterminer le rendement de celle-ci.

Le rendement d'une conduite est le rapport entre le travail disponible mesuré d'une part à l'extrémité de la conduite et d'autre part à l'origine. Pour préciser prenons 1 kilog. d'air à la température moyenne de 15° et soit P_1 la pression à l'origine de la conduite, et P la pression atmosphérique. L'air (si nous n'injectons pas d'eau) se détendrait dans un cylindre suivant une adiabatique jusqu'à la pression atmosphérique et le travail que nous pourrions retirer d'un kilog. d'air serait :

$$T = 3,43902 P_1 V_1 \left(1 - \frac{P_1^{-0,29}}{P}\right) = 3,43902 R T \left(1 - \frac{P_1^{-0,29}}{P}\right).$$

T étant la température absolue de l'air, et R un coefficient égal à 29,261.

Une conduite est en somme un vaste détendeur qui présente cette particularité que la température de l'air à la sortie, est sensiblement la même qu'à l'origine ; l'air a donc emprunté de la chaleur au milieu ambiant. Nous réaliserons, par le fait, un certain gain.

La température de l'air restant la même, le travail fourni par un kilog. d'air à l'extrémité de la conduite sera :

$$T = 3,43902 R T \left(1 - \frac{P_2}{P}^{-0,29} \right).$$

P_2 étant la pression à l'extrémité de la conduite.

Le rendement de celle-ci sera donc :

$$R = \frac{T_1}{T} = \frac{1 - \frac{P_1}{P}^{-0,29}}{1 - \frac{P_2}{P}^{-0,29}}$$

* * *

Reprenons l'exemple d'une usine de 5000 chevaux-vapeur indiqués distribuant l'air par deux conduites égales, chacune de celles-ci étant supposée distribuer 2500 chevaux.

Un cheval-vapeur indiqué aspire 10 mètres cubes d'air par heure. La pression à l'usine étant toujours supposée être de 6 atmosphères et la température de l'air à l'entrée de la conduite étant en moyenne de 15°, la formule de Darcy (1) $h = \left(\frac{L}{Q^2} \right) Q^2 \gamma L$ devient dans le cas d'un transport à 5000 mètres et en exprimant h en atmosphères

$$L = 4,09 \frac{I}{Q^2}.$$

Calculons les pertes de charge pour différents diamètres de conduite.

Diamètre en mètre	Vitesse de l'air	Perte de charge en atmosphères	Pression en atm. au bout de la conduite	Rendement de la conduite
0.300	14 m.	3	3	76.8 %
0.350	10.30 "	1.375	4.625	91.2 %
0.400	7.9 "	0.695	5.305	95.6 %
0.450	6.25 "	0.386	5.614	97.5 %
0.500	5.05 "	0.226	5.774	98 %
0.550	4.17 "	0.1395	5.8605	98.5 %
0.600	3.50 "	0.09	5.91	99 %

(1) Il continue à appliquer la formule de Darcy, en supposant que la vitesse et la densité de l'air soient constantes sur toute la longueur, parce qu'elle est d'un emploi plus commode que les formules de M. Dechamps et de M. Kraft et que les pertes de charge calculées par les trois formules ne diffèrent que fort peu entre elles.

Pour une seule conduite destinée à transporter 5000 chevaux, la perte de charge serait donnée par

$$L = 4,00 \frac{I}{Q^2} \times 4 = 16,36 \frac{I}{Q^2}.$$

Pour une conduite destinée à transporter 10.000 chevaux, la perte de charge serait donnée par

$$h = 4,09. \frac{I}{Q^2} \times 16 = 65.44 \frac{I}{Q^2}$$

Nous avons parlé de la grande influence du diamètre des conduites sur les pertes de charge ; un exemple fera mieux saisir la chose. Ainsi soit à transporter à 5000 mètres de distance l'énergie fournie par une usine de 10.000 chevaux-vapeur indiqués ; nous pourrions employer, par exemple, soit une conduite de 800 m/m de diamètre soit deux conduites de 600 m/m de diamètre soit quatre conduites de 450 m/m de diamètre. Dans les trois cas la perte de charge est la même (0,35 atm.), et le rendement de la canalisation restera constamment de 97,6 %.

On peut donc, en général, réduire la perte d'énergie due à la canalisation à fort peu de chose, en choisissant convenablement le diamètre des conduites.

Rendement de transport à 5000 mètres. — Nous avons donné dans les tableaux 1, 2 et 3, les quantités d'air dépensées par cheval heure indiqué ; elles sont évaluées d'après des résultats d'expériences qui ont déjà été obtenus en pratique ; autrement dit, ce sont là des chiffres sur lesquels on peut compter.

Je laisse de côté les chiffres calculés pour les moteurs à air chaud et à injection de vapeur, parce qu'ils demandent confirmation, aussi bien que ceux qui se rapportent à la consommation de coke. Les rendements de transport de cette dernière classe de moteurs sont certes bien supérieurs à ceux qu'on peut atteindre avec la marche ordinaire à air chaud, mais je l'ai dit et établi, le rendement de transport

ne signifie en somme pas grand'chose ; c'est le miroir aux alouettes fait pour éblouir, ceux qui ne sont pas au courant de la question.

Prenons un diamètre de 400 m/m , pour les deux conduites desservant une usine de 5000 chevaux-vapeurs indiqués : la perte de charge sera de $0,7\text{ atm}$, admettons 1 atm . Nous aurons : rendement, moteur à air froid, 51% ; rendement, moteur à air froid et injection d'eau froide, 51% ; rendement, moteur à air chaud, 76% .

Transport à 100,000 mètres. — Diamètre des conduites 600 m/m ; perte de charge 2 atm ; rendement, moteur à air froid 47% ; rendement, moteur à air froid et injection d'eau froide 52% ; rendement, moteur à air chaud 70% .

Nous obtiendrions encore les mêmes résultats en employant une conduite de 800 m/m au lieu de deux de 600 m/m .

Ainsi pour un transport à 100 kilomètres nous pourrions obtenir, à peu de chose près, les mêmes rendements que pour un transport à 5 kilomètres. N'est-ce pas une preuve de plus. que le rendement de transport ne peut en aucune manière nous permettre de juger de la valeur d'un système.

Le vrai point de comparaison, c'est le prix auquel nous pourrions vendre le cheval-utile aux abonnés, en tenant compte de toutes les charges de l'exploitation. Dans ce but, il devient très important de savoir si la formule de la perte de charge donnée par M. Riedler se vérifie. Rappelons que M. Riedler estimait que les pertes de charge réelles, sont environ la moitié de celles qu'indique la formule de Darcy.

Nous avons bien montré en parlant de moteurs à air froid, le peu d'influence de la perte de charge sur le rendement de transport et, si nous ne nous occupions que du rendement, il importerait peu que la formule de M. Riedler fut vraie ou fausse. Mais si elle était vraie, pour transporter une quantité d'air déterminée à une

distance donnée, le diamètre à donner à la conduite serait moindre qu'en suivant la formule de Darcy ; et ceci devient important.

Distribution à 12 atmosphères. — Nous ne nous sommes occupés jusqu'à présent que d'un système de transport où la pression serait maintenue à 7 atm. à l'usine ; mais dans le cas des grandes distances, ne conviendrait-il pas d'augmenter cette pression.

Cherchons ce qui arriverait si on portait la pression à 13 atm.

Compressions. — Quel est le rendement dynamique d'un compresseur fournissant de l'air à une pression de 12 atm ; des essais de ce genre n'ayant jamais eu lieu, nous en sommes réduits à demander au calcul quel pourrait être le rendement d'un tel compresseur.

Le travail nécessité par la compression d'une même quantité d'air, varie, comme nous l'avons vu, avec les divers types de compresseurs. En règle générale ce travail ne correspond ni avec celui calculé pour une compression isothermale, ni avec celui résultant d'une compression adiabatique. Pour plus de facilité nous supposerons que chaque compresseur soit caractérisé par une courbe répondant à l'équation de la loi de Poisson : $\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^K$,

K étant une valeur particulière à déterminer par expérience pour chaque cas. Ainsi pour le compresseur Cornet, la pression à laquelle on comprimait l'air était 5,21 atm. absolues, le travail indiqué aux cylindres à air était égal à 1.016 fois le travail calculé en supposant une compression isothermale. Nous pouvons, au moyen de ce chiffre, déterminer la valeur de K pour ce compresseur, en écrivant l'équation suivante :

$$1.016 P_2 V_2 \log. \text{nép.} \frac{P_1}{P_2} = \frac{K-1}{K} P_2 V_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \frac{K-1}{K} - 1 \right)$$

Après quelques tâtonnements on trouve $K = 1.05$. Si nous supposons que l'équation de cette courbe se vérifie jusqu'à une pression de 12 atm., nous trouvons que le travail indiqué aux cylindres à air serait de 1.037 I_a.

Le rendement mécanique d'un compresseur étant en général de 85 %, le rendement dynamique serait de

$$\frac{I_a}{\frac{1,037 I_a}{0,85}} = \frac{0,85}{1,037} = 0,819.$$

Pour un compresseur ayant un rendement de 80 % à 6 atm. ($K = 1.09$), le rendement calculé pour 12 atm. serait de 78,5 %.

Enfin pour un compresseur donnant 75 % de rendement à 6 atm. ($K = 1,14$), à 12 atm., le rendement dynamique serait de 72,2 %.

Pour 12 atm., le compresseur compound s'impose ; il a du reste été créé dans le but d'atteindre facilement les pressions élevées, nécessaires aux tramways, torpilleurs, etc. Nous emploierons donc le type compound où le refroidissement est beaucoup plus efficace, comme nous l'avons vu. Il est donc probable que pour une compression à 12 atm. on obtienne un rendement dynamique compris 75 et 70 % ; nous ne nous baserons, pour plus de sûreté, que sur ce dernier chiffre.

Par kilog. d'air, le travail nécessaire pour une compression isothermale sera de 21615 kilogrammètres, le travail indiqué aux cylindres à vapeur, par kilog. d'air, de 30885 kgm., et celui indiqué aux cylindres à air de 26252 kgm. Par cheval indiqué, on produira donc 8,74 kilog. d'air ou 7,15 m³.

Aéromoteurs. — Nous citerons naturellement ici les quatre classes de moteurs que nous avons examinées pour une distribution de 6 atm. Nous ne nous occuperons cependant que des moteurs adiabatiques à air froid et à air

chaud, car on ne sait rien de l'injection de vapeur dans l'air chaud, et quant à l'injection d'eau dans l'air froid, elle sera rarement employée.

Moteur à air froid. — La pression étant de 12 atm., les moteurs seront compound à 2 cylindres ; il ne peut pas être question de marcher à air froid, avec des moteurs compound, car la neige s'échappant du premier cylindre se déposerait dans le réservoir intermédiaire qu'elle remplirait bientôt.

Nous pourrions chauffer l'air de manière qu'à la sortie du premier cylindre la température de l'air soit encore de 10° à 15°, mais ce système est purement théorique : en pratique on chaufferait trop fort ou trop peu.

Nous ne pouvons cependant pas, dans une distribution par l'air comprimé, nous priver du moteur à air froid qui peut être dans certains cas, une source importante de revenu. Si l'aéromoteur n'avait qu'un cylindre, on marcherait aisément à air froid ; nous résoudrons donc cette question en réduisant au moyen d'un détendeur la pression de 12 à 8 atm.

Un tel moteur dépenserait par cheval indiqué 16,65 m³ ; par cheval utile, 19,60 m³ et le rendement de transport serait de 43 %.

Moteur à air chaud. — Admettons des pertes de charges de 1, 2, 3, 4 atm. et une température de 150° pour l'air avant son entrée dans le cylindre ; les conditions de marche seront les suivantes :

Pression en atm.	Nombre de m ³ par cheval-heure indiqué	Nombre de m ³ par cheval-heure utile	Rendement de tran	Coke nécessaire au réchauffage de l'air
11	10.35	12.20	69 %	83
10	10.62	12.50	67	85
9	10.95	12.85	65	87
8	11.30	13.30	63	90

Si on compare les rendements de transport trouvés ici avec ceux que nous obtenions en chauffant l'air à 150° dans le cas d'une distribution à 6 atm., on remarque qu'on obtient ici des rendements plus faibles, sauf quand la perte de charge devient trop forte. Ainsi avec une perte de charge de 3 atm. le rendement est ici de 65 %, tandis que précédemment il n'était que de 61 %. Remarquons que la dépense de coke nécessaire au réchauffage de l'air est moindre ici que précédemment, puisqu'un kilog. d'air sera susceptible de donner plus de travail et que le nombre de calories à lui fournir pour en augmenter la température d'un degré reste le même.

Nous répéterons ici ce que nous avons dit précédemment de la marche à air chaud. Les chiffres donnés dans ce tableau se vérifieront en pratique, car nous comptons sur de l'air sec et sur une température de 150°, alors qu'en pratique nous humecterons l'air et que nous pouvons marcher à 170°, ce qui n'augmente que fort peu la consommation de coke.

Canalisation. — Nous avons supposé que le rendement du compresseur était de 70 %, ce qui donne une production de 7.17 m³ d'air par cheval-heure indiqué ; mais pour le calcul des conduites, réservons-nous une certaine marge, et admettons que le rendement du compresseur puisse aller jusqu'à 75 %, c'est-à-dire que celui-ci fournisse 7,67 m³ d'air par cheval-heure indiqué. La formule de Darcy pour des conduites destinées à transporter 2500 chevaux à 5000 mètres, nous donne des pertes de charge exprimées par $h = 1,3 \left(\frac{1}{Q^2} \right)$. Pour un transport de 5000 chevaux par une conduite unique

$$h = 1,3 \times 4 \left(\frac{1}{Q^2} \right) = 5,2 \left(\frac{1}{Q^2} \right)$$

et pour 10000 chevaux toujours par une seule conduite

$$h = 1,3 \times 16 \left(\frac{1}{Q^2} \right) = 20,8 \left(\frac{1}{Q^2} \right)$$

Cherchons les pertes de charge avec différents diamètres pour une conduite devant transporter 2500 chevaux à 5000 mètres.

Diamètre en mètre	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
Perte de charge en atmosphère	0.96	0.437	0.232	0.123	0.0717	0.0445

Transport à 5000 mètres. — Conduite de 300 m/m de diamètre ; perte de charge une atm. ; rendement du moteur à air froid 43 % ; rendement du moteur à air chaud 69 %.

Transport à 100.000 mètres. — Nous pouvons employer soit 2 conduites de 500 m/m avec une perte de 1,5 atm.

2	»	450	»	»	2,5	»
2	»	400	»	»	4,5	»
1	»	550	»	»	3,5	»
1	»	600	»	»	2,5	»

Ainsi nous pourrions avoir, à 1 % près, les mêmes rendements de transport qu'à 5000 mètres, ce qui prouve une fois de plus que le rendement de transport est aisément porté à un taux élevé. Admettons pour 100.000 mètres une perte de charge de 4 atm. ; on aurait les rendements suivants : moteur à air froid 43 % ; moteur à air chaud 63 %.

Nouveaux aéromoteurs. — Jusqu'à présent nous n'avons encore parlé que du réchauffage de l'air à pression constante ; mais on pourrait se demander s'il y aurait économie réelle à chauffer l'air à volume constant, et si cette économie existe, essayer pratiquement d'y arriver. Si on chauffe à volume constant 1 kilog. d'air à la pression initiale de 5 atm. jusqu'à ce que la température soit devenue 150°, la pression augmentera proportionnellement à l'élévation des températures absolues, et sera, par conséquent, portée à 9.25 atm. — Le travail que ce

kilog. d'air est susceptible de produire en se détendant suivant l'adiabatique jusqu'à $\frac{1}{10}$ d'atm. est donné par

$$T = 3.43902 P_1 V_1 \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right)^{0.29},$$

équation dans laquelle V_1 représente le volume d'un kilog. d'air à 15°; on obtient ainsi $T = 20145$ kilog.

Remarquons que pour un compresseur ayant un rendement de 75 %, nous avons trouvé que le travail indiqué aux cylindres à vapeur par kilog. d'air comprimé était de 21900 kilogm. Le rendement de transport serait donc de $\frac{20145}{21900} = 92 \%$, pour cette nouvelle classe d'aéromoteurs, tandis qu'en chauffant l'air à pression constante jusqu'à 150°, on n'obtenait qu'un rendement de 76%; de plus, on sait que le calorique spécifique de l'air à volume constant est plus faible que le calorique à pression constante. Nous aurions donc tout intérêt à chauffer l'air à volume constant. Ce réchauffage ne peut se faire que lorsque l'air est entré dans le cylindre.

Deux moyens de le réaliser se présentent de suite à l'esprit : l'aéromoteur à gaz et l'aéromoteur à pétrole. On a souvent parlé de ces deux aéromoteurs, mais jamais jusqu'à présent, on ne les a essayés. L'aéromoteur à gaz serait évidemment pourvu d'un petit cylindre destiné à aspirer le gaz et à le comprimer à la pression régnant dans la conduite d'air; il se mélangerait à celui-ci dans la chapelle de distribution, et l'inflammation du mélange détonnant serait produite à l'intérieur du cylindre au moyen d'une étincelle électrique.

Pour le pétrole ce serait plus simple encore : on injecterait du pétrole dans l'air comprimé par un moyen quelconque facile à imaginer et on enflammerait celui-ci à l'intérieur du cylindre.

Par kilog. d'air, on pourrait recueillir 16280 kilogm.

soit $\frac{16200}{21900} = 74.3 \%$, mais en employant le réchauffage ordinaire de l'air on obtient déjà 76 % et le combustible coûte bien moins. Le vrai moteur à air chaud est donc celui où le réchauffage de l'air s'opère à pression constante.

On veut encore créer un autre genre d'aéromoteur à gaz ; il consisterait en un moteur à air chaud ordinaire accouplé à un moteur à gaz. La chaleur prise par l'eau dans un moteur à gaz ordinaire, et la chaleur contenue encore dans les gaz qui s'échappent du cylindre, serviraient à fournir à l'air comprimé la chaleur qui lui est ordinairement donnée dans un échangeur. De la sorte, l'air comprimé passera dans une enveloppe du cylindre à gaz et les produits de la combustion du moteur à gaz passeront, à leur tour, dans une enveloppe du cylindre à air comprimé. — M. Proëll a calculé qu'un tel moteur aura un rendement calorifique de 50 %, tandis qu'un moteur à gaz ordinaire n'en a que 16 ou 17. Quelles sottises cette obsession du rendement a fait faire ! En réalité, l'abonné se soucie fort peu du rendement ; ce qui l'intéresse, c'est le prix du cheval utile. Or, donnez-lui donc un moteur à gaz ordinaire et le cheval utile lui coûtera meilleur marché qu'avec ce nouveau aéromoteur d'une conception si fantastique, qui n'a d'autre visée que d'économiser le $\frac{1}{3}$ de centime par cheval que coûte le réchauffage de l'air au coke.

Avant d'aller plus loin, nous devons jeter un dernier coup d'œil sur les aéromoteurs et donner les chiffres de consommation d'air par cheval-heure que nous admettons dans la suite de ce travail.

Nous aurons donc, en réalité, deux types d'aéromoteurs suivant que nous marcherons à air froid ou à air chaud, ce dernier mode étant de beaucoup le plus important. Les chiffres que nous avons adoptés jusqu'à présent pour l'air chaud se rapportent à une température de 150°,

et nous avons dit qu'ils seront facilement atteints, surtout si l'on chauffe un peu au-delà de 151° ou si l'on humecte l'air avant son entrée dans le réchauffeur. Ce dernier moyen nous donnera un gain, dont nous ne connaissons pas encore l'importance ; mais nous savons déjà que le rendement mécanique, quand on marche avec de l'air chaud et sec, sera un peu inférieur que ce que nous aurions avec de l'air froid et humide : cette différence dans le rendement provient de la condensation de l'eau dans le cylindre pendant la détente. Pour des moteurs à air chaud d'une certaine puissance et marchant à grande vitesse, avec un rendement de 90 %, nous aurons, dans le cas d'une distribution à 6 atm., les consommations d'air suivantes, rapportées au cheval utile :

Pression en atm.	5.5	5	4.5	4	3.5	3
Nombre de m ³ par cheval utile. . .	14.40	14.80	15.45	16.15	17.10	18.40

Pour une distribution à 12 atm., nous aurions les dépenses d'air suivantes :

Pression en atm.	11	10	9	8
Nombre de m ³ par cheval utile	9.22	9.55	9.95	10.45

Pour la marche à air froid, nous conserverons les chiffres que nous avons indiqués précédemment.

Détermination du prix du mètre cube d'air. — Encore ici, nous nous proposerons un ensemble bien défini à traiter. Prenons donc le cas d'une usine de 5000 chevaux-vapeurs indiqués. Pour distribuer la force d'une installation de cette importance, nous admettrons que la canalisation ait 30 kilomètres de longueur. Comme nous aurons au moins deux conduites partant de l'usine, le diamètre des tuyaux sera calculé pour transporter 2500 chevaux à 5000 mètres de distance. Nous admettrons, en outre, que le bénéfice annuel soit égal à 15 % du capital engagé.

Le capital pour une installation de 5000 chevaux pourra être évalué comme suit :

Machine et tuyauterie à 350 frs. par cheval-vapeur indiqué	1,750,000 frs.
Maçonnerie à raison de 40 frs. par cheval-vapeur indiqué	200,000 »
Terrain, 4000 m ² à 50 frs. le mètre. . .	200,000 »
Conduites, 30 kilomètres de conduites de 400 m/m de diamètre, à raison de 33 frs. le mètre	990,000 »
Divers.	250,000 »

3,390,000 francs.

Le capital étant estimé, nous nous proposons maintenant de déterminer le prix de vente du mètre cube d'air répondant aux conditions que nous nous sommes imposées, à savoir que le bénéfice annuel doit être égal aux 15 % du capital engagé. Pour cela, il nous faut connaître quel sera, en moyenne, le nombre de mètres cubes d'air que nous vendrons chaque jour.

J'ai admis, en traitant la question du transport de l'énergie par les courants alternatifs, une marche moyenne de 12 heures pour toutes les machines de l'usine tournant à leur vitesse normale, ce qu'on traduit généralement en disant que le rendement de l'usine est dans ce cas de 50 %.

Ces deux manières d'exprimer la force produite en une journée peuvent créer et créent souvent dans les esprits une confusion; pour l'éviter il est utile de donner ici quelques explications. Le rendement d'une usine est le rapport entre l'énergie qui a été produite pendant une journée et celle qui aurait dû l'être si toutes les machines avaient tourné à leur vitesse normale pendant 24 heures: telle est la définition admise. J'ai dit que le rendement d'une usine destinée au transport de la force, que l'agent de transport soit l'électricité ou l'air comprimé, sera de 50 %; on ne doit pas évidemment entendre par là que la marche

de l'usine sera au minimum de 12 heures par jour, pas plus que quand je dis que la marche moyenne d'une usine est de 12 heures par jour, il ne viendra à l'idée de personne de prendre la chose au pied de la lettre. Ce sont là deux manières conventionnelles d'exprimer l'énergie produite par jour ; mais un rendement de 50 % peut aussi bien être obtenu en 24 heures qu'en 10 heures de marche réelle. Il est évident qu'en pratique nous ferons tout ce qui sera possible pour utiliser le mieux que nous pourrons le capital engagé, autrement dit produire le plus de force par jour. Remarquons d'abord que la demande variera fort peu d'un jour à l'autre, le dimanche excepté ; hiver comme été la demande restera aussi à peu près la même. Les jours de semaine, à 8 heures du matin, toutes les machines de l'usine marcheront à leur vitesse normale jusqu'à midi ; à 1 1/2 heure, le travail reprenant, nous marcherons encore dès ce moment jusqu'à 8 heures du soir en pleine charge. A partir de cette heure une faible partie des moteurs seulement continuera à marcher quelques heures et d'autres enfin toute la nuit, la proportion de ceux-ci variant avec les conditions locales.

Admettons que la force produite de 8 heures du soir à 8 heures du matin ne représente en énergie que ce qu'on obtiendrait en une heure de marche ; le rendement de l'usine sera au minimum de $\frac{11,5 \text{ heures}}{24 \text{ heures}} = 48 \%$.

En pratique nous prendrons des abonnés en nombre suffisant pour que pendant les heures de travail toutes les machines de l'usine tournent à leur vitesse normale ; les aëromoteurs alimentés, ne marcheront jamais tous ensemble : il n'y en aura, en règle générale, qu'une proportion variable avec les heures de la journée ; cela nous forcera, plus d'une fois par jour, de faire marcher les compresseurs au-dessus de la vitesse normale, et même en pratique, on marchera généralement un peu au-dessus de cette vitesse. Ainsi on obtiendra facilement un

rendement de 50 % pour l'usine; c'est un rendement minimum qui comprend, de plus, la diminution de force produite le dimanche.

Ici se présente pour bien des personnes la question de la réserve? Chaque fois que dans un travail on développe un projet de station centrale soit de transport de force, soit d'éclairage électrique, on a toujours soin de compter sur une ou deux machines de réserve; il est vrai d'ajouter que le plus souvent celui qui expose un tel projet est lui-même un constructeur et qu'il aurait bien tort de ne pas faire figurer cette réserve qui lui permettra de vendre quelques machines de plus. Dans la pratique, il n'y a jamais de réserve, et s'il y en a une, c'est qu'on n'a pas confiance dans la réussite du système qu'on emploie. Une usine bien montée, bien dirigée et d'une certaine puissance ne doit jamais avoir de machines de réserve; quant aux chaudières, il y en aura toujours deux ou trois pour permettre le nettoyage et la visite régulière.

Dans les stations d'électricité, on trouve quelquefois une réserve; c'est que la demande d'électricité est faible, et ne répond pas aux exigences qu'on avait conçues; sinon l'éclairage prenant de l'extension, la réserve aurait bientôt disparu. Si on ne peut vraiment pas se hasarder à s'en passer, c'est que le système en lui-même est défectueux, ou que la station est mal montée.

N'existe-t-il pas, en effet, quantité d'installations d'éclairage électrique dans des fabriques en ville même, dans des cafés, hôtels, restaurants, qui ne possèdent qu'une seule machine et une seule dynamo, sans batterie d'accumulateurs, et où jamais on n'a eu d'accidents ni d'interruption dans le service.

Y a-t-il une machine de réserve à bord d'un transatlantique?

Une station centrale de compresseurs n'aura donc pas de réserve. Si l'on était forcé d'arrêter un des compres-

seurs parce que la tête de bielle chauffe, seul cas qui puisse se présenter, et que le système imaginé par Westinghouse, de faire baigner le mécanisme en mouvement dans un bain d'eau et d'huile peut prévenir, si donc on était forcé d'arrêter un des compresseurs les autres pourvoiraient seuls à la demande. Il n'y aurait à cela aucun obstacle, car si les compresseurs sont fournis pour tourner en marche normale à 60 tours, il n'y a pas le moindre inconvénient à élever leur vitesse à 80 tours et même au-delà.

Si donc à de certaines heures de la journée nous sommes obligés d'avoir une marche forcée, les machines pourront toujours y suffire sans difficulté; en prévision de cette éventualité, les chaudières devront être choisies de façon à pouvoir fournir sans danger la vapeur nécessaire à la surproduction.

Cette question du choix de la chaudière est capitale, car la réparation d'une machine à vapeur est une affaire de quelques heures, mais une réparation de chaudière demande plusieurs jours. J'ai étudié antérieurement la question de savoir qu'elle était la meilleure chaudière à employer dans une station centrale d'électricité destinée à l'éclairage. Les conditions que doivent remplir les chaudières dans le cas qui nous occupent sont les mêmes que pour le problème de l'éclairage. J'ai conclu en disant que la chaudière qui se pliait le mieux à toutes les exigences et permettait d'employer sans danger les pressions élevées et le tirage forcé, était la chaudière multitubulaire.

M. G. L'Hoeest dans la critique qu'il a fait de ma communication a insisté sur les avantages que présente la chaudière de locomotive, qui est, en somme, la meilleure marché de toutes. Ces deux types de chaudières peuvent facilement fournir une quantité de vapeur plus grande que celle pour laquelle elles sont garanties; et la chaudière multitubulaire présentera toujours cet avantage sur toutes les autres, qu'une réparation la laisse aussi bonne que

neuve; il suffira en effet de remplacer les tubes brûlés, par des tubes neufs.

Fuites d'air. — On se fait en général une idée très-fausse des fuites d'air. On s'imagine que puisque une canalisation de gaz donne en moyenne 10 % de fuites, les fuites d'air doivent être bien autrement fortes puisque la pression employée est beaucoup plus élevée que celle qui règne à l'intérieur des conduites de gaz. Ces appréhensions semblent justifiées, mais la pratique montre qu'avec une canalisation bien établie les fuites d'air sont insignifiantes; ce qui en occasionne la plus grande partie, ce sont les vannes des aéromoteurs et les installations particulières; les compteurs en enregistrent d'ailleurs une certaine partie. Je compte que pour une usine de 5000 chevaux I, on aura 125 chevaux de perte par heure, soit 2 1/2 %; c'est un chiffre sur lequel on peut compter en pratique.

Consommation de charbon. — On m'a reproché de prendre 1,5 kilog. de charbon par cheval indiqué pour des machines compound et à condensation. Ainsi aux essais officiels des compresseurs Dubois et François installés à l'usine de St-Fargeau, installation qui a été faite par la Société John Cockerill, de Seraing, on a dépensé par cheval-vapeur indiqué aux cylindres 770 grammes de charbon pur (cendres déduites), soit 830 grammes du charbon brut employé.

Eh bien avec ces compresseurs en marche normale, je ne puis admettre qu'on arrive en pratique à dépenser moins de 1,3 kilog. de charbon par cheval-vapeur indiqué. Il faut savoir quelle duperie c'est qu'un essai de consommation de charbon et quelle désillusion attendrait celui qui bénévolement croirait qu'on peut réaliser en pratique des consommations de 800 grammes de charbon, et qui compterait ainsi sur la dépense de 800 grammes, majorée de 25 % pour les frais de rallumage soit en total 1 kilog. de

charbon par cheval-vapeur indiqué. Dans le contrat, le constructeur a soin de mentionner que le charbon qui servira aux essais sera fourni par lui et qu'on le lui payera. Il a donc le droit de prendre tel charbon qu'il voudra; il y a plus : comme on fixe quelquefois la proportion des cendres que doit avoir le charbon mélangé, il se fera faire spécialement, pour les essais, des briquettes, sursaturées d'hydrocarbures. Le prix qu'on demandera pour de pareilles briquettes lui importe peu. Ce n'est pas tout encore : il a sous la main des chauffeurs bien entraînés qui savent ce que c'est que chauffer et vaporiseront aisément 10 à 12 litres d'eau par kilogramme de charbon. C'est de cette manière qu'on arrive à ces consommations de 800 grammes de charbon par cheval-vapeur indiqué.

Les seuls résultats sérieux, ce sont ceux obtenus par le constructeur, quand il fait ses essais préliminaires, quelques temps avant les essais officiels, pour vérifier si tout est bien en ordre. Il se sert alors des chauffeurs et du charbon qu'il a sous la main et veille attentivement à ce que la conduite des chaudières se fasse dans de bonnes conditions; il arrive ainsi à des consommations de 1 à 1,10 kilog. par cheval indiqué, et vous le voyez très-satisfait, car aux essais il sait bien qu'il gagnera aisément 300 grammes de charbon par cheval.

Quand, en pratique et pour l'année entière, on arrivera à trouver qu'on n'a dépensé que 1,3 kilog. de charbon par cheval indiqué, on pourra dire que l'on a marché dans des conditions exceptionnelles. Je compterai donc sur 1,50 kilog. de charbon pour être certain de ne pas avoir un chiffre de consommation trop faible. Ceci étant établi, nous pourrions rechercher le prix de revient du mètre cube d'air comprimé, nous rappelant qu'un cheval-vapeur indiqué produit 10 mètres cubes d'air.

Nous produisons donc par mois $5000 \times 10 \times 12 \times 30$
 $= 18,000,000$ de mètres cubes.

Les pertes dûes aux fuites d'air seront de $125 \times 24 \times 10 \times 30 = 900,000$ mètres cubes.

Conséquemment, le nombre de mètres cubes d'air vendus par mois sera de 17,200,000 mètres cubes.

Si nous admettons un taux global d'intérêt et d'amortissement de 10 % pour les machines et chaudières, et de 7 % pour le reste, nous aurons à porter de ce chef en dépenses par mois une somme de 24000 francs.

Les dépenses du personnel de l'usine par mois seront de fr. 8,000

Les frais d'administration de » 10,000

Les dépenses de l'usine en graisse, en huile en chiffons et pour réparations de » 7,000

Soit donc, non compris le charbon, une dépense par mois de fr. 49,000

Nous basant sur ces chiffres, nous donnerons dans le tableau suivant les prix de revient et le prix de vente du mètre cube d'air, ainsi que le prix du cheval utile pour l'abonné, dans le cas de la marche à air froid et dans celui de la marche à air chaud.

Prix de la tonne de charbon en francs	Prix de revient du m ³ d'air	Prix de vente du m ³ d'air	Prix du cheval utile à air froid	Prix du cheval utile à air chaud
0	0.287 cent.	0.535 cent.	12.30 cent.	7.92 cent.
4	0.351 "	0.599 "	13.80 "	8.88 "
8	0.415 "	0.663 "	15.25 "	9.80 "
12	0.48 "	0.728 "	16.75 "	10.80 "
16	0.543 "	0.791 "	18.20 "	11.70 "
20	0.608 "	0.856 "	19.70 "	12.65 "
24	0.673 "	0.921 "	21.20 "	13.65 "
28	0.737 "	0.985 "	22.70 "	14.60 "

La perte de charge donnée par la canalisation est de 0,695 atmosphères; en réalité nous avons compté sur une perte d'une atmosphère.

Transport à longue distance. — On accorde aujourd'hui beaucoup d'importance au transport de la force à de très-

grandes distances, en vue d'utiliser les forces naturelles. Cette importance est généralement exagérée; en fait elle dépend purement et simplement du prix de la tonne de charbon dans le pays où l'on se trouve et de la distance à laquelle on doit transporter l'énergie avant de l'utiliser.

Pour des distances de 10 à 20 kilomètres, il peut se présenter des cas où nous aurons encore une usine marchant à vapeur, mais pour des distances plus grandes (à moins de conditions tout-à-fait spéciales) le transport de la force ne se fera qu'en vue d'utiliser les chutes d'eau.

Il est impossible d'évaluer d'une manière même approchée, le prix d'une usine employant la pression de l'eau, car cela peut varier considérablement suivant la conformation du terrain, la hauteur de la chute, les travaux à exécuter au bief d'amont, la longueur des conduites amenant l'eau à l'usine, etc.

Je supposerai donc, ce qui dans la majeure partie des cas sera vrai, que le capital nécessaire à l'installation d'une usine de 5000 chevaux reste le même que celui donné pour usine à vapeur; de plus j'admettrai que les frais résultant des redevances à payer, pour pouvoir utiliser la chute d'eau, etc., soient représentés par une somme équivalente à celle que nous dépenserions si la somme valait 2 francs la tonne.

J'examinerai les cas: l'usine située à des distances variant de 10 à 100 kilomètres d'une ville pourvue d'une canalisation comme nous l'avons définie précédemment. Le capital restera donc celui que nous avons établi, auquel il faudra cependant ajouter celui provenant des conduites reliant la ville à l'usine; je considérerai encore le cas: deux conduites dont les frais de pose sont évalués à 15 francs par mètre.

Ces conduites seront largement calculées, et la perte de charge dont nous nous servirons pour calculer le prix du cheval utile vendu à l'abonné comprend la perte de charge

dûe à la canalisation de l'usine à la ville, plus la perte de charge maximum éprouvée en ville, c'est-à-dire comme nous l'avons supposée à l'extrémité de la canalisation de 5000 mètres de longueur.

Nous établissons comme suit les prix du cheval à air froid et à air chaud, ainsi que le prix du mètre cube pour une distribution où la pression à l'usine est de 6 atmosphères et de 12 atmosphères.

DISTRIBUTION A 6 ATMOSPHÈRES

Distance de l'usine à la ville en kilomètres	Diamètre des conduites en millimètres	Prix de la canalisation de l'usine à la ville milliers de francs	Capital engagé milliers de francs	Prix de revient du m ³ d'air centimes	Prix de vente du m ³ d'air centimes	Pression en atm. à laquelle marchent les aeromoteurs	Rendement de transport pour les moteurs à air froid	Prix du cheval à air froid centimes	Rendement de transport pour les moteurs à air chaud	Prix du cheval à air chaud centimes
10	400	610	4 000	0.339	0.632	4	47 %	15.95	70 %	10.2
"	450	686	4.076	0.342	0.640	4.5	49	15.30	73	9.9
20	450	1 372	4.762	0.366	0.714	3.5	44	19	66	12.20
"	500	1.552	4 942	0.371	0.733	4.5	49	17.6	73	11.30
40	500	3.104	6.494	0.425	0.9	3.5	44	23.9	66	15.40
"	550	3.496	6.886	0.438	0.940	4	47	23.7	70	15.20
60	550	5.244	8.634	0.497	1.127	3.5	44	26.6	66	19.30
"	600	5.760	9.150	0.515	1.185	4	47	29.7	70	19.15
80	550	6.992	10.382	0.557	1.317	3	41	37.7	61	24.20
"	600	7.680	11.070	0.58	1.39	3.5	44	37	66	23.80
100	600	9.600	12.990	0.647	1.597	3.5	44	42.5	66	27.30

DISTRIBUTION A 12 ATMOSPHÈRES

10	300	460	3 630	0.45	0.823	8	43 %	16.10	65 %	8.60
"	350	522	3.692	0.462	0.839	11	43	16.45	69	7.74
20	350	1.044	4.214	0.486	0.916	10	43	17.95	67	8.74
"	400	1.220	4.390	0.495	0.943	11	43	18.50	69	8.70
40	350	2.088	5.258	0.537	1.074	8	43	21	63	11.25
"	400	2.440	5.610	0.555	1.128	10	43	22.10	67	10.75
60	350	3.132	6.802	0.587	1.130	7				
"	400	3.660	6 830	0.613	1.310	9	43	25.70	65	13.05
80	400	4.880	8 050	0.67	1.49	8	43	27.30	63	15.60
"	450	5.488	8.651	0.697	1.582	10	43	31	67	15.10
100	400	6.100	9 270	0.727	1.674	8	43	32.9	63	17.50
"	450	6.860	10.030	0.763	1.788	9	43	35	65	17.80
"	550	5.120	8 290	0.688	1.528	8	43	30	63	16

Le dernier chiffre du tableau se rapporte au cas d'une seule conduite d'air desservant l'usine. Nous voyons par

les chiffres du tableau que le transport à une pression de 12 atmosphères, est beaucoup plus économique que celui où la pression ne serait que de 6 atmosphères, ce qui était d'ailleurs à prévoir.

Je n'ai traité que deux systèmes de distribution à 6 et à 12 atmosphères ; à chaque cas particulier comprendra une pression donnant la meilleure solution, et qu'on déterminera par quelques tâtonnements.

(L'abondance des matières nous contraint de remettre au prochain bulletin la publication de la fin de ce travail).

M. de Weydlich, *président*, remercie M. Bayet de sa communication et propose d'en remettre la discussion à une prochaine séance. Adopté.

M. Henrard n'ayant pu assister à la réunion, a fait parvenir au bureau la note suivante dont M. De Bast donne communication à l'assemblée.

Secteur Victor Popp, à Paris.

Le présent article a pour but de décrire et de discuter le nouveau secteur Popp, de Paris.

J'ai divisé cette présente communication en plusieurs chapitres formant chacun un ensemble déterminé et traitant successivement les points suivants : 1° Exposé général du secteur ; 2° Batteries d'accumulateurs ; 3° Haute tension ; 4° Canalisations ; 5° Les appareils de distribution ; 6° Les manœuvres de stations et sous-stations ; 7° Résultats et conclusions.

Exposé général du secteur ()*. — La force motrice nécessaire à l'exploitation du secteur est fournie par un premier réseau d'air comprimé qui alimente trois stations centrales d'électricité.

(*) Tout le chapitre intitulé : Exposé général du secteur est tiré d'une instruction délivrée aux conducteurs de stations.

Cet air comprimé est produit dans deux usines, l'une à la rue St-Fargeau, l'autre au quai de la Gare. (Cette dernière est en construction.)

Les trois stations centrales d'électricité sont situées au Retiro, à la Bourse du Commerce et à la rue Dieu.

De chacune de ces usines sort un circuit à haute tension qui traverse en tension des batteries d'accumulateurs placées dans des sous-stations.

Le réseau de charge du Retiro alimente les sous-stations suivantes: 416, rue Saint-Honoré; 221, rue Saint-Honoré; 11, rue Gaillon; 2, rue de l'Echelle; 2, rue Saint-Augustin; 21, rue de la Paix; 45, rue Cambon.

Le réseau de charge de la Bourse du Commerce alimente les sous-stations suivantes: 54, rue Etienne Marcel; 5, rue Feydeau; Théâtre des Variétés; 108, rue Richelieu; Passage de Saumon; 36, boulevard Sébastopol; 8, rue Péruelle; Bazar de l'Hôtel-de-Ville; 31, rue des Bourdonnais.

Le réseau pénètre également dans la station de la rue Bourg-l'Abbé, mais sans y charger de batterie, en vue d'une combinaison que nous expliquerons plus loin.

Ces deux réseaux sont à câbles doubles et constituent chacun deux circuits parallèles prenant ou négligeant les batteries de certaines stations, dans lesquelles ils sont mis en court-circuit par le commutateur général.

Cette disposition a l'avantage d'équilibrer en temps normal les différentes sous-stations, suivant les besoins de l'exploitation; en outre, elle permet des groupements provisoires en cas d'accidents sur les lignes, et certaines modifications dans la base même de l'exploitation, en utilisant les lignes soit en quantité soit en tension.

Le troisième réseau de charge, dépendant de la rue Dieu, est à câble simple et parcourt les sous-stations suivantes: 83, rue Turbigo; 9, rue Bourg-l'Abbé; Passage Lemoine; 4, rue d'Hauteville; 13, boulevard Voltaire.

Enfin, une quatrième usine d'électricité, qui marche actuellement à la vapeur, et située 35, boulevard Richard Lenoir, complète l'ensemble des réseaux de charge, par deux circuits se dirigeant, l'un par le boulevard Beaumarchais, du côté de la place de la Bastille, l'autre du côté de la place de la République.

Le premier circuit alimente les deux sous-stations suivantes: 6, rue Malher; 20, rue de la Verrerie.

Le second circuit alimente également deux sous-stations: 70, boulevard Beaumarchais; 6, rue de Franche Comté.

Les quatre réseaux dont nous venons d'indiquer le parcours et qui constituent des circuits séparés, se rapprochent les uns des autres ou même se touchent en plusieurs points; et l'on a établi en ces points, entre les deux réseaux voisins, des communications qui, en temps normal, sont coupées, mais permettraient, en cas d'accident sur l'un d'eux, de le commander par l'un quelconque des autres.

Ces communications sont au nombre de quatre.

1° Entre la sous-station Saint-Augustin qui appartient au réseau du Retiro et la station Feydeau, qui appartient au réseau de la Bourse du Commerce, il existe une ligne de quatre câbles morts aboutissant à leurs deux extrémités à deux tableaux habituellement fermés.

2° Entre la sous-station du Bazar de l'Hôtel-de-Ville, qui fait partie du circuit de la Bourse du Commerce, et la sous-station de la Verrerie, qui fait partie du circuit du boulevard Richard Lenoir, il existe une courte ligne de câbles morts, analogue à la précédente, mais à deux fils seulement.

3° La sous-station de la rue Bourg-l'Abbé, qui appartient au circuit de la rue Dieu, reçoit aussi, comme on l'a vu plus haut, le circuit de la Bourse du Commerce, qui, en temps habituel, ne fait que traverser la sous-station de

la rue Bourg-l'Abbé, mais pourrait éventuellement être relié au réseau de la rue Dieu.

4° Enfin, même disposition à la station de la rue Franche Comté, où l'on peut combiner les deux réseaux Richard Lenoir et rue Dieu.

Tout ce qui précède se rapporte uniquement aux circuits de charge. On trouvera à la suite de cet article un plan du secteur Popp portant le tracé des câbles de charge, l'indication des 4 stations principales et l'indication de toutes les stations d'accumulateurs ainsi que celle des points de jonction des circuits de charge des 4 sous-secteurs.

Ces câbles de charge sont de 20 m/m de section; on pourra juger, dès à présent, à quelle dépense inouïe de câble et de cuivre entraîne une exploitation de ce genre, surtout si l'on considère que ces câbles, ayant à subir une tension de 2400 volts, doivent présenter une isolation considérable et que l'isolation coûte beaucoup plus cher que le cuivre.

Je crois inutile d'approfondir beaucoup la question des câbles de distribution, ceux-ci présentant peu de particularités.

Leur principe repose sur l'emploi d'un système dit rayonnant et qui n'a guère de rayonnant que le nom.

Chaque sous-station forme une petite station centrale qui alimente le voisinage par des câbles, d'une longueur maximum de 250m comptée au départ de la station. Ces circuits sont, paraît-il, calculés de la sorte pour éviter des pertes de charge trop considérables.

Cette distance peu considérable entraîne encore à une perte de charge énorme si l'on se représente qu'il passe 200 ampères dans ces câbles de 200m/m; la prise de courant se faisant parfois au bout de la ligne seulement et le secteur marchant normalement à 120 volts, on voit que l'on n'a plus guère (avec 500m aller et retour) que 110 à 111

volts aux bornes, ce qui est une perte considérable pour des circuits d'abonnés. Nous reviendrons plus loin sur la question d'isolation et de canalisation.

Dans les quartiers excentriques les circuits d'abonnés sont en boucle et en câbles nus.

Batteries d'accumulateurs. — Les accumulateurs sont du système Laurent-Cély et sont fabriqués par la Société du *Travail électrique des métaux*. Chaque élément se compose de 300 kilogs de plaques dont chacune pèse 20 kilogs. Ces accumulateurs passent pour subir des charges et décharges rapides à raison de 3 ou 4 ampères par kilog. de plaque utile. Il me serait difficile de donner confirmation de la chose, les batteries que j'ai vues se chargeant à raison de 200 ampères et déchargeant à peu près dans les mêmes conditions.

On a beaucoup parlé de la grande capacité de ces accumulateurs; on affirme même une capacité de 10 ampères par kilog. de plaque. Ce que je puis affirmer c'est qu'une surcharge au-dessus de 6 ampères ne semblait aucunement augmenter les ampères-heures de décharge et que cette surcharge ne servait qu'à abaisser leur rendement dans de notables proportions.

Ces accumulateurs, à mon avis, sont comme tous les accumulateurs connus, des appareils qui tous ayant un aspect robuste, n'en sont pas moins délicats.

Un accumulateur quel qu'il soit, est bon quand il est bien conduit et bien entretenu; ce qui différencie une espèce à l'autre, c'est la capacité, et encore les différences ne sont pas énormes.

Quoiqu'il en soit, les accumulateurs Laurent-Cély sont relativement robustes et de construction soignée, mais leur prix est élevé. C'est là le plus sérieux reproche qu'on puisse leur faire, car tant que l'on n'aura pas réalisé la confection d'accumulateurs d'un coût minime, l'emploi de ces organes ne sera pas bien justifié.

Je terminerai ce qui concerne les batteries d'accumulateurs par quelques mots sur la fabrication des éléments Laurent-Cély.

On coule dans un moule des pastilles rectangulaires de chlorure de plomb fondu auquel on a mêlé un peu de chlorure de zinc. Ces pastilles solidifiées sont alors placées dans un moule spécial où elles se trouvent naturellement arrangées pour occuper leur position définitive dans la plaque terminée. Ces pastilles sont amincies sur leurs bords de manière à former biseau, de même que les pastilles des plaques Gadot. On coule dans le moule du plomb qui vient former le grillage destiné à soutenir les pastilles. De cette façon, on a un grillage extrêmement solide emprisonnant fortement les pastilles: le tout semble coulé d'une seule pièce.

Les plaques ainsi construites sont placées dans un bain d'eau additionnée légèrement d'acide chlorhydrique et on les dispose de manière à en faire les pôles de piles dont les seconds pôles sont des plaques de zinc placées entre les plaques d'accumulateurs.

Cette pile, fermée en court circuit, donne lieu à la création d'un courant qui décompose le chlorure de plomb et transforme ce chlorure en plomb spongieux.

Les plaques sont ensuite placées dans un bain d'eau acidulée à 10 % d'acide sulfurique et reliées par moitié aux bornes d'une dynamo; on transforme ainsi le plomb spongieux en minium ou en litharge, suivant que les plaques sont à un pôle ou à l'autre.

Afin d'augmenter la quantité de substance active, on complète les pastilles des plaques positives par du peroxyde de plomb et celles des négatives par du plomb spongieux saturé d'hydrogène et l'on procède à une nouvelle formation.

Isolation des batteries. — Quand on charge les batteries en tension et par conséquent lorsqu'on est tenu d'em-

ployer des voltages élevés, on comprend aisément que l'on soit obligé de requérir pour les batteries une résistance à l'isolement considérable. La manipulation des batteries en charge est dangereuse et l'on doit chercher par tous les moyens possibles à les isoler parfaitement du sol.

Théoriquement, cela paraît simple, mais pratiquement il n'en est pas ainsi. Je crois, pour ma part, qu'il est plus difficile d'avoir une batterie bien isolée après sa construction et qui conserve son bon isolement après sa mise en charge et décharge, que de construire des lignes à bon isolement.

L'atmosphère humide des salles d'accumulateurs et les projections acides aux approches d'une charge complète, détruisent rapidement l'isolement d'une batterie.

A la Compagnie Popp, la Société *le Travail électrique des métaux* avait pris les mesures suivantes :

Les plaques d'accumulateurs ayant près d'un mètre de hauteur permettaient difficilement leur pose sur plusieurs étages, et par conséquent sur chassis; on avait établi sur le sol des madriers paraffinés sur lesquels on avait posé des isolateurs de fortes dimensions et formés de deux pièces s'emboitant l'une dans l'autre.

La périphérie de la partie supérieure de l'isolateur recouvre entièrement l'inférieure et ne permet pas à l'eau acidulée pouvant couler le long des caisses, de venir remplir la partie inférieure de l'isoloir.

Cette partie inférieure contient de l'huile lourde de pétrole qui est très-bon isolant et la supérieure qui a son creux renversé contient de la paraffine. Il est nécessaire cependant de changer de temps à autre l'huile lourde de pétrole qui prend peu à peu l'humidité et qui pourrait au bout d'un certain temps abandonner la place à l'eau plus ou moins acidulée qui s'accumule sous elle.

Sur ces isolateurs viennent se placer des madriers identiques aux premiers et sur ceux-ci les mêmes isola-

teurs qui reçoivent enfin les caisses d'accumulateurs; ces dernières sont en bois et doublées de plomb.

Malgré ces précautions, l'isolation des batteries, qui montait parfois à plusieurs mégohms après le montage, tombait après quelques jours de marche à quelques dizaines de milliers d'ohms.

Pour remédier aux projections acides, on avait recouvert l'eau acide des caisses par de l'huile lourde.

Cette huile lourde a un effet heureux, c'est de diminuer considérablement les émanations et les projections mais par contre, elle a le grave inconvénient d'accumuler par bouillonnement des quantités assez considérables de gaz détonnant.

L'approche d'une allumette enflammée, un court circuit dans un élément où l'on retire une plaque mauvaise ou sur lequel on fait toute autre manipulation, produisent des explosions d'un caractère assez sérieux pour occasionner des dangers graves.

Je préfère encore une simple ventilation du local, par un ventilateur quelconque.

A la Compagnie Popp on a essayé de faire mouvoir les ventilateurs par l'électricité, mais l'atmosphère acide détériorait complètement les moteurs. On les a remplacés par des aéromoteurs qui sont des appareils plus robustes et par conséquent moins sujets à se détériorer.

Devant les rangées d'éléments, il est nécessaire de placer des plaques de caoutchouc pour éviter davantage encore les effets de la haute tension des batteries en charge. Quand on fera une manipulation quelconque, on se munira de gants en caoutchouc et l'on ne se servira jamais que d'une seule main à la fois, quand on touchera aux tableaux de distribution, afin de ne pas recueillir d'un bras à l'autre des décharges à 2400 volts, qui sont plus que suffisantes pour tuer un homme.

Le personnel doit donc être sérieux et bien choisi et de plus être soumis à une surveillance minutieuse.

Cette remarque s'appliquera chaque fois qu'il s'agira de haute tension et par conséquent d'appareils en charge ou décharge.

Pour la décharge, les précautions sont moins grandes et mêmes futiles puisque la tension aux bornes des appareils ou circuits ne dépasse pas 120 volts.

Décharge des batteries. — La charge d'une batterie ne coïncide jamais avec sa décharge. Cela a pour but de ne pas mettre les abonnés en contact avec les hautes tensions.

C'est donc au point de vue de la sécurité des clients que cette mesure est prise.

Il est d'ailleurs nécessaire dans l'intérêt de sa bonne conservation, que la batterie soit chargée quand elle ne décharge pas et réciproquement qu'elle ne décharge pas machine derrière.

Cela ne s'explique guère et cependant tous ceux qui ont conduit des batteries d'accumulateurs s'accordent à dire qu'une batterie trop faible pour décharger seule, sans le secours de la dynamo, ne fonctionne jamais aussi longtemps dans de bonnes conditions qu'une batterie capable de recevoir la charge qu'elle doit rendre pour faire le service seule en décharge.

Je signalerai également que le personnel faisant la manipulation des accumulateurs doit être sérieux et plus instruit qu'on ne pourrait le croire à première vue.

Les stations d'accumulateurs ne sont pas toujours pourvues d'appareils enregistreurs indiquant les charges et décharges successives soit en watts, soit en ampères-heures.

Quoique beaucoup de fabricants d'accumulateurs prétendent qu'une surcharge n'est jamais nuisible, je puis vous affirmer qu'elle est au contraire détestable pour la bonne conservation des éléments.

Celui qui en a quelque peu la pratique dira comme moi que, outre le gondolement des plaques, la surcharge occasionne encore, par le bouillonnement du liquide, une désagrégation des pastilles et leur mise hors d'usage en quelques mois.

Le conducteur d'une station semblable doit être assez intelligent pour proportionner les charges aux décharges ; il doit surtout veiller à ce que dans les batteries où le voltage est réglé par réduction ou augmentation du nombre d'éléments, les éléments réducteurs soient chargés dans la proportion de leur décharge ; car, ces éléments déchargent beaucoup moins que ceux du corps même de la batterie et par conséquent l'emmagasinement dans ces éléments doit être d'autant plus faible que leur numéro les éloigne davantage du milieu de la batterie.

A la Compagnie Popp, il n'avait été établi aucun moyen mécanique permettant à la batterie de se déclarer chargée et occasionnant sa mise en charge automatiquement. De plus, on tenait peu compte d'une décharge antérieure pour l'évaluation de la charge suivante.

A Londres, au contraire, tout se faisant automatiquement ; on avait combiné un appareil basé sur le dégagement de gaz d'une plaque d'accumulateurs pendant la période comprenant le « presque état de charge complète », à une surcharge de faible durée, mais prévue.

L'appareil employé se composait d'une enveloppe d'ébonite entourant une portion de plaque d'accumulateur ; cette enveloppe plongeant dans le liquide servait de collecteur au gaz dégagé ; la partie supérieure portait une tubulure permettant l'adaptation d'un tuyau de caoutchouc dont l'autre extrémité venait plonger sous le ballon d'un petit gazomètre. La capacité de ce dernier était calculée de façon que, après la surcharge faible dont je vous parlais tout-à-l'heure, le gaz dégagé au contact de la plaque pendant une demi-heure environ opérât une ascension donnée du ballon. Cette ascension de grandeur

déterminée produisait la fermeture du circuit d'un relai commandant énergiquement le passage de la batterie de la charge à la décharge et la remise en charge d'une autre batterie.

Cette manière de juger le degré de charge est donc indépendante de la science du personnel.

Il existe des moyens beaucoup plus simples de réaliser cette détermination d'état de batterie.

Citons les densimètres, la couleur des plaques, le bouillonnement du liquide, le voltage séparé des éléments qui fournissent autant de moyens de contrôle, mais qui exigent l'emploi d'un personnel en permanence à la station.

Qu'il me soit permis, en terminant ce qui concerne les accumulateurs de recommander la pose, aux extrémités même de la batterie, de plombs de sécurité. Eviter autant que possible de les placer au tableau de distribution.

Plus ils seront près des caisses, plus ils auront d'effet et plus de sécurité l'on aura quant aux dangers d'incendies et quant aux possibilités de détériorations des éléments par l'effet de courts circuits et de pertes franches à la terre.

Haute tension. — Toutes les batteries étant chargées en tension, le potentiel aux bornes du circuit de charge varie de 2000 à 2400 volts.

On comprend aisément le danger qui résulte d'une tension semblable et l'on conçoit qu'un tel mode de distribution entraîne à des précautions d'isolation considérables.

Pour éviter ces hautes tensions chez les abonnés, on place dans les différentes sous-stations deux batteries au minimum afin que la batterie qui alimente les abonnés ne soit jamais en contact avec la ligne de haute tension. La batterie qui décharge est donc complètement retirée du circuit de charge et l'on n'a ainsi qu'une tension de 120 volts maximum chez les clients.

La canalisation étant réservée pour un chapitre spécial, nous ne verrons ici que l'isolation des appareils de distribution et d'alimentation et les précautions de sécurité vis-à-vis du personnel ouvrier.

A. *Dynamo*. — Les dynamos employés à la charge des accumulateurs sont des dynamos dites de moyenne tension et de moyenne intensité ; leur voltage aux bornes est de 400 volts et leur débit de 200 ampères. (Excitation indépendante).

La construction d'une dynamo semblable n'offrirait donc aucune difficulté immédiate, si ces dynamos étaient destinées à fonctionner séparément ; mais, du moment où elles sont couplées en tension pour la charge à raison de 5 ou 6 en même temps, ces dynamos de moyenne tension doivent être capables de subir des tensions considérables et les armatures doivent présenter les conditions de sécurité des machines dynamos à haute tension.

Ces dynamos seront donc assez coûteuses.

Le type des dynamos de la seule station marchant actuellement, celle du boulevard Richard Lenoir, était le type multipolaire Edison.

L'isolation du collecteur par rapport à l'arbre, présentait probablement quelque élément défectueux car cinq à six dynamos ont subi des accidents en tous points identiques sur lesquels je n'insisterai pas, les dynamos réparées n'ayant pas eu à ma connaissance de nouvelles avaries.

B. *Tableaux de distribution*. — Les tableaux de distribution étaient en bois de chêne supportant immédiatement des commutateurs spéciaux construits sur ardoise.

Ces appareils construits par la maison Bréguet et combinés par cette maison de concert avec un jeune ingénieur de talent de la Compagnie Popp, M. Lafarge, étaient très-bien imaginés et n'ont pas que je sache reçu la moindre critique quant à leur isolation. Ils réalisaient, du

reste, parfaitement le but pour lequel ils avaient été construits. On conçoit cependant que des appareils où toutes les parties sont en cuivre nu offrent beaucoup de dangers quant aux manipulations. Il suffit d'une terre sur la ligne pour tuer un homme qui frôle de la main un appareil semblable.

Les règlements sont des plus sévères ; chaque ouvrier de station est muni de gants de caoutchouc et de sandales de même substance. Chaque fois qu'il fait une manœuvre, il lui est expressément défendu de se servir à la fois de ses deux mains. Il doit opérer d'une main seulement pendant qu'il conserve l'autre en poche.

A chaque visite d'inspecteur, il doit présenter ses gants et ses sandales afin d'en faire constater le bon état de conservation.

Il lui est ordonné d'essuyer chaque jour ses tableaux de haute tension avec des chiffons de laine chauds, mais aux seuls moments de l'arrêt sur le circuit de charge. Il doit veiller à ce que les godets, supports des accumulateurs, soient constamment garnis d'huile spéciale de pétrole.

Il lui est interdit de mettre une batterie en charge s'il n'a vérifié au préalable l'état d'isolation de cette batterie.

Ces règlements d'intérieur dans le cas de hautes tensions sont d'une importance considérable et le moindre oubli peut avoir des conséquences désastreuses, tant pour le personnel des manipulations que pour le matériel de distribution.

Canalisation. — Quand on étudie une distribution, il convient de rapprocher le principe du système de distribution du mode de canalisation qu'il entraîne.

En électricité, la canalisation a l'avantage de tenir peu de place ; on peut par des sections relativement faibles faire passer des puissances considérables.

Mais si l'espace exigé par une canalisation électrique est restreint, le prix du matériel nécessaire à sa confec-

tion est très-élevé: le fil de cuivre nu coûte cher, le fil de cuivre isolé est d'un prix exorbitant.

On doit donc bien étudier dans tous ses détails la partie « canalisation » d'une distribution, car elle est d'une importance capitale et influe, par sa valeur élevée, d'une façon très sensible sur le prix de revient de l'hectowatt.

Une canalisation, pour se présenter dans des conditions avantageuses, doit satisfaire à beaucoup de conditions dont les principales sont les suivantes :

- 1° Elle doit être d'une construction facile et rapide ;
- 2° Elle doit présenter des conditions d'isolement en rapport avec la tension du courant qui doit la parcourir.
- 3° Elle doit être facilement accessible aux réparations et aux branchements des abonnés.
- 4° Son amortissement doit pouvoir se répartir sur un grand nombre d'années ou en d'autres termes elle doit avoir une vie très-longue.
- 5° Le calcul des sections de cuivre doit tenir compte des frais d'exploitation. En un mot, l'application de la loi de Thomson s'impose.

La Compagnie Popp a voulu, semble-t-il, essayer de tous les systèmes de canalisation.

Avant la construction du secteur actuel, elle a employé les deux modes de canalisation suivants, qui entraînent le tirage des câbles.

Ces systèmes de canalisation sont encore en vigueur sur quelques petits réseaux.

a) Tuyaux de fonte avec trous-d'homme de 20 mètres en 20 mètres et câbles sous plomb. Ce système est d'une simplicité rustique, s'obtient à bon marché et est d'une application rapide.

Il a comme désavantage le tirage des câbles qui importe assez peu avec des sections élevées, mais qui est d'une importance capitale avec des câbles de $10 \text{ m}^2/\text{m}^2$ comme

ceux des lignes Thomson Houston qui alimentaient les grands boulevards de Paris.

Il a de plus, comme conséquence immédiate, de mêler ensemble tous les câbles, de rapprocher complètement les fils de polarités contraires et par conséquent d'entraîner à la solidarité entre tous les circuits parcourant un même tuyau. Un accident sur une ligne peut amener la détérioration de tous les circuits adjacents.

L'essai qu'en a fait la Compagnie Popp n'a pas été heureux; ce mode de canalisation est maintenant abandonné et les derniers vestiges de tuyaux de fonte sont destinés à disparaître à bref délai.

Ce système ne permet non plus la visite des câbles que de 20 en 20 mètres. Si un accident soude ensemble plusieurs câbles dans un tuyau, ce dernier doit être cassé pour qu'on puisse atteindre le point fautif et l'on doit couper tous les câbles pour pouvoir remplacer le tuyau hors d'usage: donc, frais énormes d'entretien.

b) L'inconvénient de la solidarité des câbles fut probablement la cause dominante du changement de canalisation et l'objectif principal dans sa réalisation.

On maintient les tuyaux de fonte, mais on y introduit des gâines de bois paraffinés; cela évitait la solidarité immédiate et augmentait sensiblement la valeur de l'isolation, mais augmentait le défaut du tirage des câbles en restreignant davantage l'ouverture du passage de chacun d'eux. De plus, les gâines de bois, au lieu d'être seulement superposées avaient été assemblées entre elles par des pointes qui, souvent mal dirigées venaient traverser les espaces parcourus par les câbles et déchiraient ceux-ci sur des longueurs considérables.

Le câble neuf devenait vieux après la pose.

Ce système qui, de plus, faisait de lui-même le repérage des câbles, aurait pu devenir une amélioration très-sensible du cas précédent s'il avait été mieux nourri et mieux étudié dans sa réalisation.

Comme le précédent, il ne permettait pas d'atteindre les câbles sur toute leur longueur. Il n'eût du reste pas plus de succès que celui qu'il remplaçait.

C'est quelque temps après ce dernier insuccès que l'on commença le secteur Popp, basé sur l'emploi des accumulateurs.

Les défauts graves des deux systèmes précédents conduisirent à l'idée d'une canalisation semblable mais modifiée en tenant compte de tous ces inconvénients.

On a remplacé le tuyau de fonte par un caniveau de même substance avec couvercle de fonte et les trous-d'homme ont été conservés. On a gardé les gaines de bois paraffinés mais elles n'ont plus été que superposées. De cette façon, en cas d'accident, un simple terrassement permet la visite des câbles. Le repérage est facile et le câble se pose et ne se tord plus.

Une canalisation semblable exige donc :

1° Destruction du bitume ou enlèvement des pavés du trottoir.

2° Terrassement sur un mètre environ de profondeur et 50 centimètres de largeur.

3° Pose des caniveaux de fonte.

4° Pose successive des gaines au fur et à mesure de la pose des câbles.

5° Pose du couvercle protégeant le tout contre des surcharges.

6° Remblai et réfection des trottoirs.

7° Confection de trous d'homme.

Cette canalisation est efficace mais coûte assez cher par mètre courant; le caniveau de fonte et les moulures paraffinées sont d'une valeur relativement faible, mais toutes ces précautions n'ont pour but que la séparation des câbles, leur repérage et leur protection contre les surcharges. Il n'y a là aucun effet d'isolation à attendre.

Une canalisation semblable ne peut donc servir que pour des câbles justifiant d'eux-mêmes d'une isolation suffisante.

Donc, elle conviendra parfaitement pour des câbles isolés; elle écarte complètement l'emploi de câbles nus; elle pourra servir utilement pour des lignes de charge d'accumulateurs, à haute tension, mais elle me semble trop chère pour de la basse tension.

Ce mode de canalisation a donné, au point de vue électrique, de bons résultats; dans les systèmes *a* et *b* une prise de courant chez un abonné se faisait dans un trou d'homme; dans le système actuel on casse le caniveau à l'endroit du branchement et l'on y place une boîte de jonction en fonte à joints étanches permettant une imperméabilité complète. Les épissures se font au centre de boîtes de jonction.

Je n'ai jamais bien compris la nécessité de cette façon de brancher les abonnés. Rien n'empêchait l'emploi de caniveaux de fonte en forme de T bien moins coûteux que l'assemblage précédent.

La Société qui faisait la pose des câbles garantissait 1200 megohms par kilomètre après la confection des épissures et la pose complète d'une ligne. Ces clauses du contrat ont été parfaitement remplies.

Ce système de canalisation a été employé à la fois pour les câbles à haute tension et les réseaux rayonnants à basse tension du centre de la ville.

c) Enfin, on emploie dans les quartiers excentriques du secteur, la canalisation en caniveaux de béton avec isolateurs à cloche comme dans les secteurs Marcel Deprez et Edison.

Cette canalisation coûte cher quant aux caniveaux et aux isolateurs, mais elle a l'avantage considérable de permettre l'emploi de câbles nus pour la haute tension. Ce système donne facilement accès aux câbles et c'est en

somme un bon procédé de canalisation quant à sa pose et à sa confection. Mais au point de vue électrique il est mauvais. Il donne des isolements très-faibles.

En temps humide, l'isolation descend souvent en-dessous de 100 ohms pour un réseau de l'importance de celui d'Edison, à Paris.

Je trouve la canalisation genre Siemens d'une grande simplicité et d'un bon marché réel; s'il m'est donné un jour de faire un réseau de ville, j'adopterai sans hésitation des câbles armés, posés purement et simplement sur un lit de sable au fond d'une fouille, ainsi que l'a fait le secteur Clichy, de Paris.

Comme garantie contre la destruction probable par des fouilles postérieures, un simple grillage de fer galvanisé est enfoui en-dessous du trottoir ou à 30 ou 40 centimètres en-dessous du pavé des rues.

Cette canalisation est réellement pratique, ne demande qu'une bonne confection des épissures et ce n'est là qu'une question de soins de la part de l'ouvrier et de surveillance de la part des entrepreneurs.

Les câbles armés ne sont pas d'un prix bien considérable; ce prix ne dépassent pas celui des câbles sous plomb.

L'emploi de ces câbles peut servir à la fois pour la basse et la haute tension.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons traité de la canalisation qu'au point de vue des courants continus. C'est la seule qui soit à considérer dans l'étude du secteur de la Compagnie Popp.

Je terminerai ici ce qui se rapporte à la canalisation. Je compte reprendre un jour cette question plus en détail devant vous.

(à continuer).

M. de Weydlich, *président*, remercie M. Henrard et M. De Bast pour la communication qui vient d'être faite.

M. de Weydlich, *président*. La question que soulève notre camarade Bayet a déjà donné lieu à un examen approfondi au sein du Comité. Toutefois, il n'y aurait aucun inconvénient à la discuter à nouveau dans la séance d'avril. Adopté.

Digitized by Google

SÉANCE DU 26 AVRIL 1891

Présidence de M. de Weydlich, président.

Ont signé la liste de présence MM. Bayet, Chantraine, Colard, Coune, Dawson, De Bast, Demarteau, De Ryckere, Durand, Even, Farman, Emile Gérard, Eric Gerard, Kreglinger, L'Hoest, Libert, Mélotte, Orban, Roosen, du Welz et de Weydlich.

Le procès-verbal de la séance du 22 février est approuvé.

M. De Bast expose, au nom de M. Cruciani qui en est l'auteur, la note suivante :

Note sur un procédé graphique pour le calcul des enroulements des dynamos.

Lorsqu'on doit construire une dynamo, la méthode généralement employée et bien connue est celle d'Hopkinson, basée sur la théorie du circuit magnétique. Cependant cette méthode, à cause de quelques facteurs incertains, qu'il faut se fixer d'avance, ne se prête pas aisément au calcul des dynamos compound.

Pour obtenir un résultat plus certain, M. Arnoux a proposé dans ces derniers temps un procédé qu'on trouve dans l'excellent ouvrage de notre professeur M. Eric Gerard.

Ce procédé peut donner lieu à une méthode générale.

L'application de celle-ci au calcul des enroulements des dynamos en série, en dérivation, compound et hyper-compound fait l'objet de la présente communication.

La marche à suivre pour fixer les dimensions de l'induit, son bobinage ainsi que les dimensions de la carcasse est la même dans la méthode d'Hopkinson et dans celle en question.

Je me bornerai à l'indiquer à grands traits, en passant à dessein sous silence les nombreuses données pratiques et expérimentales qu'on trouve dans tous les *Traité*s d'Electricité, et qui ont fait tout récemment l'objet d'une communication de M. Mélotte.

Pour le calcul des enroulements inducteurs, la méthode d'Hopkinson consiste à appliquer la théorie du circuit magnétique à la carcasse. Il faut pour cela connaître d'avance comment se comportent au point de vue magnétique les matériaux à employer, et se fixer certains facteurs, d'après les limites entre lesquelles ils varient dans les bons types de dynamos.

Dans la méthode que je propose, on essaie directement la carcasse, et des résultats d'expérience représentés graphiquement on peut déduire, comme l'on verra, tous les éléments nécessaires pour déterminer, d'une façon très-sûre, le bobinage des inducteurs.

Connaissant la puissance électrique de la dynamo à construire, et se fixant au préalable quelques données, comme la vitesse, la perte par échauffement et la densité de courant, on parvient à arrêter toutes les dimensions de l'induit et son bobinage.

Le flux de force magnétique, qu'on est amené par le calcul à faire passer dans l'induit, détermine, par un choix convenable du coefficient de perte, le flux de force que les électros doivent produire.

D'après ce flux et en se basant sur les valeurs de l'induction magnétique que les matériaux à employer peuvent raisonnablement supporter, on peut fixer les sections des différentes parties de la carcasse.

La longueur de quelques unes de ces parties est donnée par le type de la dynamo qu'on a choisi; la longueur de quelques autres, celle des électros, est déterminée de manière que la chaleur produite par l'effet Joule puisse se dégager par rayonnement ou par convection.

Pour appliquer la méthode d'Hopkinson il ne reste plus qu'à écrire l'équation du circuit magnétique, le parcours des lignes de force, ainsi que les sections de la carcasse étant relevés sur le croquis de la machine.

Un tableau dressé à l'avance, d'après des essais magnétiques faits sur les échantillons des matériaux à employer, donnera les valeurs correspondantes de l'induction et de la perméabilité magnétiques.

L'équation, résolue par rapport à la seule inconnue qui reste, donne les ampères-tours d'excitation.

Ce méthode se heurte à plusieurs difficultés.

D'abord il faut prévoir un coefficient de perte de flux magnétique. Un tel coefficient, même choisi à tout hasard dans les limites entre lesquelles il varie, est largement suffisant pour attribuer des sections très-convenables aux différentes parties de la carcasse, mais son emploi n'est pas justifié pour fixer le bobinage des inducteurs, ce qui est une chose bien plus importante et d'où dépend le succès de la machine.

Vu l'importance qu'il y a de connaître le plus exactement possible ce coefficient, on a cherché à le calculer directement. Le calcul est assez laborieux même quand on l'applique à la forme la plus simple de carcasse (*).

L'avantage pratique en est très-discutable surtout si l'on peut avoir recours aux coefficients de perte tirés d'expériences sur des dynamos de type semblable à celui de la machine qu'on veut construire.

D'ailleurs il serait très-important d'obtenir ce coefficient avec exactitude s'il était le seul élément incertain.

Dans les dynamos ayant la carcasse constituée de plusieurs pièces démontables le flux magnétique atteint

(*) Voir R-V. Picou. *Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques*. Baudry, Paris.

parfois des valeurs bien différentes de celles trouvées par le calcul. En effet, le contact entre deux pièces juxtaposées ne peut jamais offrir la même intimité que si la carcasse était coulée d'une seule pièce. On ne peut absolument pas tenir compte de ce fait dans l'essai magnétique des échantillons: au contraire, on tâche d'y réaliser la continuité métallique la plus absolue du circuit magnétique pour qu'on puisse avoir assez de confiance dans les résultats.

Une autre donnée à fixer est la réaction d'induit.

Tout cet ensemble d'éléments incertains doit naturellement donner lieu à des divergences parfois considérables entre le résultat pratique et celui qu'on voulait obtenir. On est forcé alors de corriger la dynamo et d'avoir recours à des modifications de la vitesse et du bobinage.

Lorsqu'il s'agit d'une dynamo excitée en série et qui travaille généralement sur un même point de la caractéristique, il est aisé de la corriger. Il suffit le plus souvent de modifier la vitesse de l'induit. On peut toujours le faire si dans le calcul de l'induit on a eu soin de ne pas choisir la vitesse limite que celui-ci peut supporter sans danger. Si la vitesse est imposée il faut modifier forcément le bobinage des inducteurs: cela n'est plus aussi facile.

Une shunt-dynamo peut être corrigée de la même manière; dans ce cas il est très-facile d'ajouter ou de retrancher une ou plusieurs couches de fil sur les électros.

Quand il s'agit d'une dynamo compound la chose n'est pas aussi simple. Une telle dynamo doit donner une différence de potentiel pratiquement constante presque sur toute l'étendue d'utilisation de la caractéristique.

En outre, elle représente un état, pour ainsi dire, d'équilibre. En effet, à chaque point de la caractéristique correspondent certaines pertes électriques et une certaine

réaction d'induit. Or, pour un bon compoundage, en chaque point ces pertes et cette réaction doivent être compensées par le surcroît de flux magnétique provoqué par les électros en série ou par ceux-ci et les électros en dérivation à la fois, suivant qu'il s'agit d'une dynamo compound à long ou à court shunt.

Toute modification, toute correction à apporter à la machine construite montre naturellement l'imperfection de la méthode de calcul suivie.

L'idéal à atteindre serait évidemment d'avoir une méthode permettant de calculer la dynamo de telle sorte que le résultat pratique soit parfaitement d'accord avec les prévisions du calcul.

Je serais heureux, si la méthode que je vais exposer pouvait marquer un progrès, si petit qu'il soit, vers cet idéal.

Dans cette méthode, on détermine la carcasse comme dans celle d'Hopkinson, et, après sa construction, on enroule sur les noyaux des inducteurs des bobines provisoires. Ces bobines sont reliées à une batterie d'accumulateurs, par exemple. Dans ce circuit on intercale un rhéostat ; le courant est mesuré par un ampèremètre. On met en marche l'induit à la vitesse pour laquelle on l'a calculé, et qu'on tâche de maintenir constante autant que possible. En reliant les balais à un voltmètre et en modifiant convenablement le courant exciteur, il est facile de tracer la courbe des *f. e. m.* à circuit ouvert en fonction des ampères-tours d'excitation (courbe *a* des figures). On répète les mêmes expériences en faisant en sorte que l'induit débite son courant maximum. On peut alors tracer la courbe des différences de potentiel à pleine charge, toujours en fonction des ampères-tours d'excitation (courbe *b* des figures). D'une manière analogue on peut tracer les courbes *b'*, *b''*, etc., correspondant à des courants intermédiaires fournis par l'armature. Les ordonnées comprises entre la courbe *a* et l'une quelconque

des courbes *b* représentent évidemment les pertes de potentiel provoquées par la résistance de l'induit et par sa réaction magnétique, lorsque celui-ci débite le courant qui correspond à la courbe considérée, et en fonction des diverses excitations.

La courbe *a* représente l'allure de la courbe du magnétisme de la dynamo, puisque la *f. e. m.* à circuit ouvert représente, à un coefficient constant près, le flux de force. On peut en déduire, pour une excitation donnée, quel sera le flux de force qui passera dans l'induit. Cette courbe tient donc compte en elle-même de toutes les pertes de flux de force inhérentes à la carcasse donnée, et qui dépendent de sa forme et des qualités magnétiques des matériaux employés ; cela en fonction des ampères-tours d'excitation.

Il est évident que ces courbes renferment implicitement toutes les données pour lesquelles l'électricien devrait tâtonner s'il voulait employer la méthode d'Hopkinson.

Dans tout ce qui va suivre on supposera avoir construit les courbes *a* et *b*, et à une échelle assez grande pour pouvoir apprécier à leur juste valeur les cotes du dessin.

Dynamos en série. — Soit à calculer l'enroulement d'une dynamo, excitée en série, capable de débiter *I* ampères sous une tension de *E* volts.

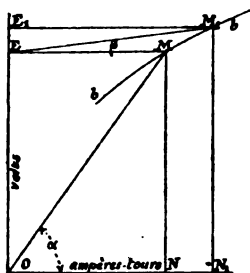


Fig. 1.

La courbe *a* n'a pas d'emploi dans ce cas, et on supposera tracée la courbe *b*, l'induit débitant son courant total *I*. (Fig. 1).

Prenons l'ordonnée *OE* égale à la tension *E* qu'on veut obtenir aux bornes. Par son extrémité menons l'horizontale *EM* jusqu'à sa rencontre avec la courbe *b*.

L'abscisse du point *M* détermine les ampères-tours *ON*.

Si l'on s'arrêtait à ce résultat on ne tiendrait pas compte de la résistance des électros qui occasionne naturellement une perte de tension.

Si R_s est la résistance des spires en série ; $R_s I$ est la perte de tension, et la *f. e. m.* aux balais doit être $E + IR_s$. On prendra donc EE_1 égal à IR_s volts. La ligne horizontale menée par E_1 détermine le point M_1 , dont l'abscisse ON_1 représente les ampères-tours nécessaires pour obtenir la tension E aux bornes, l'induit débitant le courant I .

Puisque ce courant circule tout entier à travers les électros, il est facile de déterminer le nombre N_s des spires à enrouler sur les noyaux, une fois connu le nombre total des ampères-tours.

On remarquera en passant que la tangente trigonométrique de l'angle M_1EM représente la résistance r_s d'une spire des inducteurs. En effet :

$$\text{tg. } M_1EM = \frac{EE_1}{ON_1} = \frac{IR_s}{IN_s} = \frac{R_s}{N_s} = r_s$$

On arriverait donc au même résultat que tantôt en menant du point E la droite EM_1 inclinée par rapport à l'horizontale EM d'un angle β tel qu'on ait

$$\text{tg. } \beta = r_s \quad (*)$$

Lors d'une application pratique, afin de déterminer tous les éléments du bobinage des électros, on peut se donner la perte P en watts consentie dans l'excitation et vérifier

(*) Dans les applications pratiques, comme on le verra, ayant trouvé la valeur de r_s , pour mener la ligne EM , il faut faire attention aux échelles adoptées pour représenter les volts (ordonnées) et les ampères-tours (abscisses). Si ces échelles sont égales (à savoir si $1^m/m$ représente par exemple 1 volt et 1 ampère-tour) l'angle β est tel que $\text{tg. } \beta = r_s$. Mais, (ce qui arrive toujours, si l'on veut donner des dimensions convenables au dessin) si l'échelle des ampères-tours est plus grande que celle qui représente les volts, et si m est le rapport de ces échelles, il faut évidemment mener la ligne EM , de telle sorte que l'on ait $\text{tg. } \beta = mr_s$.

si la densité du courant se trouve comprise dans de bonnes limites, ou vice-versa.

Dans le premier cas, la perte P nous permet de déterminer la résistance totale R_e des électros, ainsi que la perte de tension IR_e occasionnée par ceux-ci.

Connaissant la valeur de IR_e et de I on peut tout de suite, comme on l'a vu, déterminer sur l'épure les ampères-tours ON_1 nécessaires et par suite le nombre N_e de spires.

Des dimensions de la carcasse on déduit facilement la longueur moyenne l d'une spire.

La section à donner aux spires des bobines excitatrices sera :

$$q = \rho \frac{l N_e}{R_e}$$

Après cela il faut vérifier si la densité du courant $\frac{I}{q}$ est comprise dans de bonnes limites.

Si ce n'est pas le cas, on modifie la perte P et après un ou deux essais on parvient sûrement à faire correspondre à une perte P raisonnable une densité de courant convenable.

Dans l'autre cas on se fixe la valeur ρ de cette dernière. La section est alors donnée par la relation $q = \frac{I}{\delta}$ et la résistance d'une spire des électros est

$$r_e = \rho \frac{l}{q}$$

Si m est le rapport des échelles adoptées pour représenter les ampères-tours et les volts, il suffira alors de tracer du point E la ligne EM_1 telle que $\operatorname{tg} \beta = m r_e$.

On obtient dès lors les ampères-tours ON_1 nécessaires, et par suite le nombre N_e des spires à enrouler sur les électros.

La résistance totale est $R_e = r_e N_e$.

Et la perte $P = I^2 R_e$.

Le guipage du fil (ou des fils groupés en quantité) à employer pour réaliser les N_s spires de section q , et la hauteur des noyaux des inducteurs déterminent le nombre des spires par couche et le nombre des couches.

Un exemple numérique ne sera pas hors de propos pour fixer mieux les idées sur la méthode en question.

Supposons qu'on veuille calculer une dynamo, excitée en série, capable de débiter 100 ampères sous une tension de 70 volts aux bornes. (1)

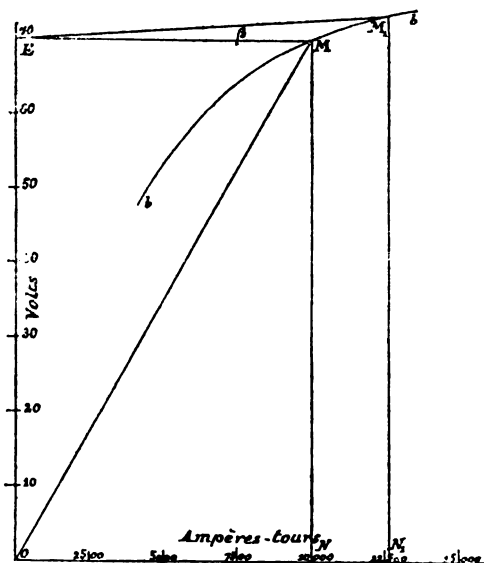


Fig. 2.

(1) Une dynamo en série d'un voltage aussi faible et débitant un courant assez considérable ne sera peut-être jamais réalisée.

On sait que les dynamos en série conviennent pour l'éclairage par arc en série et pour le transport de la force à distance; elles doivent donc débiter un faible courant sous une grande tension.

Mais cela n'exclut pas d'ailleurs la possibilité de construire des dynamos en série dans les conditions indiquées; et puis j'ai choisi à dessein l'exemple numérique en question parce qu'il conduit à des résultats qui peuvent se rencontrer dans le calcul des électros en série des dynamos compound.

Ayant choisi le type de la dynamo, on calcule l'induit ainsi que les dimensions des différentes parties de la carcasse. On construit ensuite la dynamo et on l'essaie comme il a été indiqué. On trace la courbe b (à pleine charge) et supposons qu'elle ait l'allure indiquée sur la figure 2, où l'on a adopté 1 millimètre pour représenter un volt et 250 ampères-tours.

Le rapport des échelles est donc dans ce cas $m = 250$.

Admettons $\delta = 1,5$ ampère par $\overline{mm^2}$; la section est

$$q = \frac{100}{1,5} = 67 \overline{mm^2} \text{ environ.}$$

Supposons que le parcours moyen d'une spire (déduit de la carcasse) soit $l = 0^m,70$; la résistance d'une spire est

$$r_s = 0,02 \frac{0,7}{67} = 0,00021 \text{ ohms.}$$

On a alors $\text{tg. } \beta = mr_s = 0,052$.

qui correspond à un angle $\beta = 3^\circ$.

On mène alors la droite EM_1 ayant cette inclinaison par rapport à la ligne EM . L'abscisse du point M_1 donne, par la figure, $ON_1 = 11250$ ampères-tours.

Le nombre total des spires est donc

$$N_s = \frac{11250}{100} = 113$$

la résistance totale est

$$R_s = 113 \times 0,00021 = 0,0237 \text{ ohm}$$

la perte en watts

$$P = 0,0237 \times \overline{100^2} = 237$$

ce qui correspond à 4% environ de la puissance totale de la dynamo.

Dynamos en dérivation. — Soit à calculer l'enroulement d'une shunt-dynamo capable de débiter un courant extérieur I sous une tension E aux bornes.

Dans la détermination de l'induit, il faut prévoir celui-ci pour un courant $I + i$; i étant le courant circulant dans la dérivation.

C'est avec ce courant $I + i$ qu'on supposera avoir tracé la courbe b . (Fig. 1).

Pour avoir une tension E aux balais (qui dans ce cas représentent aussi les bornes de la dynamo) il faut, d'après la figure, $ON = ni$ ampères-tours d'excitation.

En considérant le triangle MON on a :

$$\text{tg. } MON = \text{tg. } \alpha = \frac{E}{ni} = \frac{i R_d}{ni} = r_d$$

à savoir, la tangente trigonométrique de l'angle MON représente la résistance d'une spire des électros en dérivation.

Ces données déduites de la figure suffisent pour fixer tous les éléments du bobinage des électros.

En effet, la perte P consentie pour l'excitation donne la résistance R_d totale que les spires des inducteurs doivent avoir. La formule qui relie ces quantités est

$$P = i^2 R_d = \frac{E^2}{R_d}$$

$$\text{d'où} \quad R_d = \frac{E^2}{P}$$

$$\text{Or on a aussi} \quad nr_d = R_d$$

$$\text{d'où} \quad n = \frac{R_d}{r_d}$$

La carcasse fournit la longueur moyenne l d'une spire ; la section du fil à enrouler sur les inducteurs est alors

$$q = \rho \frac{nl}{R_d} \quad (I)$$

On pourrait arriver plus vite au résultat en se donnant à priori la valeur de i .

Avec cette valeur et celle des ampères-tours ON déduite de la figure, on a immédiatement le nombre n des spires des électros.

La résistance R_d que ceux-ci doivent posséder pour donner passage au courant i est évidemment

$$R_d = \frac{E}{i}$$

Ayant trouvé les valeurs de n et R_d , on peut au moyen de la formule (1) déterminer la section q .

Dans l'un et l'autre cas il faut vérifier si la densité de courant $\frac{i}{q}$ est admissible; en cas contraire, il faut modifier la perte P jusqu'à obtenir une densité de courant convenable.

Cependant, comme la perte P varie dans des limites plus étendues que la densité de courant, il est préférable, afin de réduire les tâtonnements pour concilier les deux éléments, de suivre le chemin inverse, à savoir, de se fixer la densité de courant et de vérifier après si l'on peut accepter la perte P qui s'ensuit.

On peut alors procéder de la manière suivante. Ayant déduit la valeur de r_d de la figure, et celle de l de la carcasse, la section d'une spire des inducteurs est

$$q = \rho \frac{l}{r_d}$$

En admettant une densité δ , δq est le courant circulant dans les électros.

Le nombre total des spires est évidemment donné par la relation

$$n = \frac{E}{q \delta r_d}$$

La résistance totale est $R_d = n r_d$
et la perte $P = R_d \overline{q \delta}^2$

Pour faire une application numérique, prenons la même dynamo que nous avons considérée tantôt, capable de débiter un courant extérieur de 100 ampères sous la tension de 70 volts aux bornes.

Supposons, pour ne pas compliquer la figure 2, que la courbe *b* corresponde à un courant d'induit de 104 ampères par exemple, et cela pour tenir compte du courant qui circulera dans les électros en dérivation.

Pour une tension de 70 volts, l'épure nous donne
ON = 10000 ampères-tours.

La résistance d'une spire de l'excitation est

$$r_d = \frac{70}{10000} = 0,007 \text{ ohm.}$$

Le parcours moyen d'une spire (déduit de la carcasse) étant $l = 0^m,70$, la section du fil des inducteurs sera

$$q = 0,02 \frac{0,70}{0,007} = 2 \text{ mm}^2$$

En admettant $\delta = 1,5$ ampère par mm^2 , le courant dérivé est $q\delta = 3$ ampères
et par suite le nombre total des spires

$$n = \frac{70}{3 \times 0,007} = 3334$$

dont la résistance totale est

$$R_d = 0,007 \times 3334 = 23,34 \text{ ohms.}$$

La puissance dépensée dans l'excitation est

$$P = 3^2 \times 23,34 = 210 \text{ watts,}$$

ce qui correspond environ à 3 % de la puissance totale de la dynamo.

Le fil à enrouler sur les inducteurs aura donc un diamètre de 1,6 millimètre. Son guipage et la hauteur des noyaux détermineront le nombre des spires par couche et le nombre des couches.

En toute rigueur, ayant admis d'abord un courant dérivé de 4 ampères et le calcul donnant $q\delta = 3$ ampères, il faudrait tracer une nouvelle courbe, l'induit débitant

un courant de 103 ampères et de cette nouvelle courbe déduire, comme tantôt, tous les éléments du bobinage des électros.

On peut s'en tenir définitivement au résultat qu'on obtiendrait ainsi puisque maintenant l'écart entre le courant de 3 ampères admis et celui qui effectivement circulera dans les électros sera moindre qu'un ampère.

Dans chaque cas particulier, l'exactitude avec laquelle on a réalisé les expériences sur la carcasse et surtout la sensibilité des appareils employés diront si l'on peut négliger ou non un écart de 1 ou 2 ampères entre le courant d'excitation admis tout d'abord et celui qui est donné par le calcul.

Dynamos compound. — Il faut distinguer deux cas : les dynamos compound à longue et à courte dérivation.

a) Supposons la dérivation prise aux bornes.

Comme par hypothèse la tension aux bornes doit demeurer constante, il est évident que les électros en dérivation donneront toujours lieu à la même force magnéto-motrice, que la dynamo fonctionne en circuit ouvert ou fermé.

La *f. é. m.* en circuit ouvert est due évidemment aux inducteurs en dérivation ; les inducteurs en série doivent seulement compenser les pertes de tension provoquées par les résistances et par la réaction d'induit.

Soit E la différence de potentiel à obtenir aux bornes.

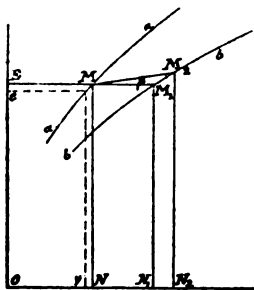


Fig. 3.

On prend $OE = E$ (fig. 3) et par le point E on mène l'horizontale EM jusqu'à rencontrer la courbe a . L'abscisse de M détermine les ampères-tours ON nécessaires à circuit ouvert pour obtenir aux bornes la tension demandée. Ces ampères-tours doivent être fournis par les électros en dérivation.

D'après cette donnée relevée sur l'épure on détermine tous les

éléments du bobinage comme pour une simple machine en dérivation.

Mais la dynamo doit donner la même différence de potentiel à pleine charge. Il suffit alors de prolonger EM jusqu'à rencontrer la courbe *b* en M_1 . L'abscisse de ce point donne les ampères-tours totaux ON_1 déterminant la tension E aux balais.

Pour tenir compte de la perte de tension occasionnée par la résistance des électros en série, il suffit, comme on l'a vu pour les dynamos en série, de tracer la droite MM_2 inclinée de telle sorte par rapport à l'horizontale EM_1 qu'on ait

$$\text{tg. } \beta = r, m$$

r , étant la résistance d'une spire des inducteurs en série et m le rapport des échelles.

L'abscisse du point M_2 détermine les ampères-tours totaux ON_2 nécessaires pour obtenir la tension E aux bornes. Comme ON représente les ampères-tours des électros en dérivation, NN_2 sont ceux des électros en série.

Cette dernière donnée permet de déterminer tous les éléments du bobinage en série, comme s'il s'agissait d'une simple dynamo en série, avec la remarque que maintenant l'origine des coordonnées est transportée au point N.

Les applications numériques, faites à propos des dynamos en série et en dérivation séparément, me dispensent d'en faire pour les dynamos compound en général, puisque ces dynamos, telles qu'elles sont employées dans l'industrie, sont constituées par une shunt-dynamo et une série-dynamo possédant la même carcasse.

Une remarque à faire est la suivante :

Lorsque la dynamo travaille en circuit ouvert, les bobines en série produisent elles aussi un flux magnétique, étant traversées par le courant de la dérivation.

Le procédé indiqué précédemment conduirait donc à des bobines en dérivation plus efficaces qu'il n'est nécessaire.

On peut facilement apprécier le surplus d'excitation produit par les électros en série, et, s'il le faut, on peut en tenir compte par la méthode des approximations successives.

On détermine à l'aide des données qu'on relève sur l'épure les éléments des bobinages en série et en dérivation. Cela fait connaître le courant i dérivé ainsi que le nombre N_s des spires en série. Les ampères-tours produits par celles-ci à circuit ouvert sont évidemment $N_s i$.

Il suffit alors de retrancher de ON la portion $N_v = N_s i$.

Puisque les ampères-tours totaux ON_2 nécessaires pour obtenir aux bornes la tension donnée OE ne sont pas changés, non plus que la valeur de r_s , on en déduit que O_v représente les ampères-tours des électros en dérivation et vN_2 ceux des électros en série. Les ampères-tours O_v donneraient lieu pour leur compte à une tension Oe aux bornes, naturellement moindre que celle qu'on veut obtenir.

Maintenant on peut répéter les opérations, à savoir déterminer le nouveau courant dérivé i' et le nouveau nombre des spires en série N'_s d'après les ampères-tours O_v et vN_2 respectivement.

On retranchera de O_v les ampères-tours $N'_s i'$, et on obtiendra ainsi encore de nouveaux ampères-tours pour les électros en dérivation et pour les électros en série.

Les portions telles que N_v décroissent de plus en plus, jusqu'à ce que, après un ou deux essais, on arrive à une valeur soit inappréciable sur l'épure soit assez petite pour pouvoir la négliger sans que cela puisse nullement être préjudiciable au résultat pratique attendu de la machine.

La construction graphique qui a été indiquée assure le compoundage de la dynamo à circuit ouvert et à pleine charge.

Maintenant, il n'est pas sans importance de connaître les différences de potentiel pour des courants intermédiaires, ou mieux encore de pouvoir sur l'épure même tracer la courbe de ces tensions.

Si le compoundage était rigoureux, il est évident que la tension aux balais, lorsqu'on passe du circuit ouvert à la pleine charge, devrait suivre la ligne MM_2 ; à savoir, cette tension aux balais devrait croître proportionnellement au courant débité, ou ce qui revient au même, comme la perte de tension dans les bobines en série.

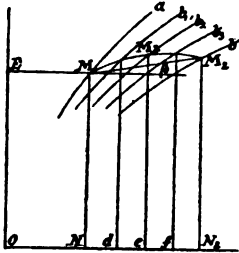


Fig. 4.

par le courant total.

Supposons avoir tracé expérimentalement les courbes b' b'' b''' correspondant respectivement par exemple à $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ du courant total (fig. 4). On divisera dans le même rapport N N_2 qui représente les ampères-tours des électros en série, puisque ceux-ci auront réduit dans la même proportion leur effet magnétisant, étant parcourus

Les points d'intersection des courbes b' b'' b''' avec les ordonnées tracées respectivement par les points d e f , sont évidemment sur la courbe MM_3 M_2 des tensions cherchées. Il est dès lors facile de chercher cette ligne. Elle présente sa concavité vers l'axe des abscisses. L'ordonnée maximale comprise entre la courbe et la droite MM_2 donne l'écart maximum en volts de la différence de potentiel aux bornes. Cet écart dans les bonnes dynamos compound ne doit pas dépasser 1 ou 2 volts. On remarquera que la courbe MM_3 M_2 se confondrait avec la ligne MM_2 si les courbes a b' b'' etc. étaient des droites.

On peut conclure de là que pour un bon compoundage il faut autant que possible faire travailler la dynamo sur la partie droite des courbes.

Il s'ensuit encore que les dynamos ayant la carcasse constituée presque en totalité par du fer se prêtent à un meilleur compoundage que les dynamos à carcasse en fonte.

b) Supposons que la dérivation soit prise aux balais.

On détermine comme précédemment les ampères-tours nécessaires pour obtenir à circuit ouvert la tension demandée. Dans le cas considéré il n'y a pas lieu de tenir compte des ampères-tours produits par les bobines en série, puisque celles-ci, à circuit ouvert, ne sont parcourues par aucun courant.

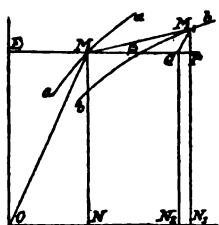


Fig. 5.

En effet, la différence de potentiel aux balais doit croître proportionnellement au courant débité par l'induit, ou ce qui revient au même, comme la perte de tension dans les électros en série.

Ce surcroît de potentiel aux balais occasionne naturellement une augmentation du courant dérivé, et par suite, un accroissement dans les ampères-tours de la dérivation.

Pour apprécier cet accroissement, il suffit de tirer par M_1 la droite $M_1 Q$ parallèle à OM .

La différence des abscisses des points P et Q , c'est-à-dire la portion $N_1 N_2$, donne le surcroît des ampères-tours des électros en dérivation.

En effet, l'ordonnée $M_1 P$ représente la perte de tension occasionnée par les inducteurs en série, ou l'accroissement

Du point M (fig. 5), on trace la droite MM_1 , telle que

$$\operatorname{tg} \beta = r. m.$$

L'abscisse du point M_1 détermine les ampères-tours totaux.

Il faut cependant remarquer que, dans ce cas, les ampères-tours de la dérivation ne demeurent pas constants comme dans le cas précédent.

e_1 de potentiel aux balais (voir dynamos en série). La tangente trigonométrique de l'angle $MON = PM_1Q$ représente la résistance r_d d'une spire des inducteurs en dérivation (voir dynamos en dérivation).

Le triangle M_1PQ nous donne donc

$$e_1 = PQ \times r_d$$

La portion PQ représente naturellement des ampères-tours : on peut donc écrire

$$e_1 = n_d i_1 \times r_d$$

Or, e_1 étant l'accroissement de potentiel aux balais, i_1 est évidemment l'augmentation du courant dérivé.

Donc, $n_d i_1 = QP = N_1 N_2$ représente l'accroissement des ampères-tours en dérivation.

Comme conclusion, pour obtenir la tension E aux bornes, la dynamo fonctionnant à pleine charge, il faut NN_2 ampères-tours fournis par les électros en série. Les électros en dérivation fourniront alors $ON + N_1 N_2$ ampères-tours.

Les éléments du bobinage en série seront donc déterminés d'après les ampères-tours NN_2 , comme pour une simple dynamo en série.

Les ampères-tours ON détermineront le bobinage en dérivation, comme pour une simple shunt-dynamo. L'accroissement $N_1 N_2$ n'interviendra dans les calculs que pour vérifier si, malgré l'augmentation du courant dérivé, la densité de courant est restée dans des limites convenables.

Il résulte des considérations présentées, qu'une dynamo compound à courte dérivation demande pour l'excitation moins de cuivre qu'une dynamo compound à longue dérivation. Elle est par suite plus économique.

Il n'est pas difficile, même pour une dynamo compound à courte dérivation, de déterminer les différences de potentiel correspondant à des courants intermédiaires.

Alors NN_2 sont les ampères-tours des électros en série, d'après lesquels on détermine tous les éléments de leur bobinage.

Les électros en dérivation sont définis par les ampères-tours ON , de telle sorte que l'accroissement $N_3 N_2$ ne fasse pas franchir à la densité de courant les limites admissibles.

Dans l'un et l'autre cas, pour que l'hyper-compoundage de la dynamo soit rigoureux, il faut que la tension aux balais suive la droite MM_3 .

En mettant à profit tout ce qui a été dit en traitant des dynamos compound, il ne sera pas difficile de dresser la courbe des tensions intermédiaires, après avoir d'abord tracé, à l'aide d'expériences, des courbes, analogues aux courbes a et b , correspondant à des courants d'induit compris entre une valeur nulle et la valeur maxima.

Comme conclusion, on aura remarqué que les courbes a et b sont la base du procédé graphique que je viens d'exposer.

Ayant tracé ces courbes à une échelle convenable et apporté le plus grand soin possible aux essais magnétiques exécutés sur la carcasse, la méthode graphique en question est des plus simples puisqu'elle se réduit au tracé de quelques lignes sur l'épure et à l'application des formules les plus élémentaires.

Sur l'axe des abscisses on lira les éléments nécessaires pour déterminer, connaissant la carcasse de la dynamo, le bobinage des inducteurs.

M. de Weydlich, *président*, remercie M. Cruciani pour son intéressante communication et M. De Bast pour le soin qu'il a mis à en faire une claire exposition à l'assemblée. Il serait très-intéressant de savoir si la méthode de M. Cruciani a déjà été appliquée et éventuellement, si dans l'application, l'acuité de l'angle en M ne nuit pas à l'exactitude du résultat.

La discussion de ce travail pourra se faire après sa publication au bulletin. Adopté.

M. **Chantraine**, exprime le vœu de voir fixer les séances à des dates invariables.

M. **de Weydlich**, *président*.—En principe, nos réunions ont lieu le dernier dimanche de chaque mois; il peut se présenter cependant telle circonstance qui motive soit un ajournement de la séance habituelle, soit la convocation à une séance supplémentaire.

M. **Bayet** demande la discussion de sa proposition de créer une revue bibliographique en annexe au bulletin.

Après débats, il est décidé que la rédaction de la chronique sera assurée, comme par le passé, par le secrétariat général; de plus, on pourra admettre sous la même rubrique, les comptes-rendus, traductions, etc., émanant des membres de l'Association, sous réserve de leur examen préalable par la Commission d'examen des mémoires, qui décidera de leur insertion.

M. *le Professeur Eric Gerard* croit utile d'annoncer que l'Institut compte se rendre à l'exposition de Francfort en juillet ou en août. Les membres de l'Association pourraient participer à cette excursion et jouir ainsi de toutes les facilités qui seront données aux élèves de l'Institut. La date précise de cette visite sera communiquée ultérieurement.

M. **de Weydlich**, *président*, remercie M. le Professeur Gerard de l'invitation qu'il adresse aux membres de l'Association.

La séance est levée à une heure.

CHRONIQUE.

L'Inductance et son unité proposée le " Henry , —

Sous ce titre, a paru dans le *Weston Electrician* du 27 décembre 1890, un article, signé par Kenneby, que nous résumons ci-après en en développant cependant quelques parties.

Après avoir rappelé les découvertes d'Oersted et d'Ampère et celles de Faraday sur l'induction électro-magnétique, l'auteur dit que le développement de cette partie de la science électrique nécessite l'adoption d'unités pratiques. Au premier rang de celles-ci, il place l'unité d'inductance ou, comme on l'appelle plus souvent, le coefficient de self-induction.

La self-induction est une propriété aussi essentielle à chaque conducteur que la résistance et la capacité électro-statique. Quand le circuit est traversé par des courants variables, ce facteur devient souvent plus important que la résistance à la conductibilité.

On sait que la loi d'Ohm n'est plus applicable à un circuit, aussi longtemps qu'il est traversé par des courants instables, à moins qu'on ne tienne compte de l'inductance ou de la force contre-électro-motrice produite et qu'on n'introduise cette dernière dans l'expression de la loi d'Ohm.

Dans le système d'unités électro-magnétiques, les dimensions d'un coefficient de self-induction sont représentées par une longueur. Et celui-ci peut être évalué comme les relations géométriques du circuit, c'est-à-dire que si la distance de chaque point aux autres points du circuit est mesurée en pouces ou en centimètres, le coefficient de self-induction sera également évalué en pouces ou en centimètres.

Si le circuit contenait du fer ou toute autre substance magnétisable, la perméabilité magnétique devrait entrer

comme facteur. Dans le système d'unités absolues C.G.S., le coefficient de self-induction doit s'exprimer en centimètres et le centimètre est alors l'unité scientifique naturelle.

Le professeur Rucker a indiqué que la multiplication du facteur de perméabilité magnétique par le facteur longueur doit toujours être sous-entendue, s'il n'est pas expressément indiqué, même lorsque le circuit se trouve loin de toute matière magnétisable, c'est-à-dire, quand il est placé dans un milieu dont la perméabilité magnétique est l'unité ; le coefficient de self-induction serait donc de la nature d'une longueur multipliée par la perméabilité magnétique. Les physiciens n'ont pas encore décidé de la perméabilité magnétique. En pratique, en effet, on déduit par la formule

$$\mu = 1 + 4\pi K$$

de la perméabilité magnétique μ d'une substance, le coefficient d'aimantation induite K de la même substance, la perméabilité étant déterminée directement. K est représenté par un nombre abstrait: c'est en effet, le rapport de l'intensité d'aimantation à l'intensité du champ. Dans le système électro-magnétique déduit de la loi de Coulomb

$$f = K' \frac{q q_1}{r^2},$$

K' dépendant de la nature du milieu, on suppose que K' est un coefficient purement numérique que l'on prend égal à 1 pour l'air. La nature de ce coefficient nous est encore inconnue. On ne peut donc décider actuellement si la perméabilité magnétique doit être exprimée par un nombre abstrait ou par une fonction de la longueur, de la masse ou du temps. La nature réelle du coefficient de self-induction serait donc considérée comme douteuse. La question est cependant du domaine de la théorie pure et n'affecte pas la considération de l'unité pratique.

Selon Sumpner, il y a trois manières de définir le

coefficient de self-induction. Elles sont exprimées algébriquement par les formules suivantes :

$$e = L_1 \frac{di}{dt} \quad (A)$$

$$\frac{N}{i} = L_2 \text{ et } l = \frac{d(L_2 i)}{dt} \quad (B)$$

$$T = \frac{1}{2} L_3 i^2 \quad (C)$$

D'après (A) le coefficient de self-induction serait le rapport de la force contre-électro-motrice produite par le courant dans le circuit, à la variation de l'intensité du courant.

Suivant (B) ce serait le rapport entre l'induction totale à travers un circuit et le courant la produisant.

Selon (C) ce serait le coefficient par lequel il faut multiplier la moitié du carré de l'intensité du courant pour obtenir l'énergie électro-cinétique du circuit à chaque instant. Si le circuit est formé complètement de matière de perméabilité magnétique *constante*, les coefficients L_1 , L_2 et L_3 sont identiques ; mais il n'en est pas de même si les circuits sont constitués partiellement ou complètement d'une matière magnétique, telle que le fer, à moins que l'on tienne compte de la perméabilité magnétique des substances magnétisables.

En d'autres termes, le coefficient de self-induction d'un solénoïde creux en fil de cuivre, a la même valeur numérique suivant que l'on applique l'une ou l'autre des trois définitions ; mais si un noyau en fer est introduit dans le solénoïde, le coefficient de self-induction dépendra de la définition adoptée ; les trois valeurs ne seront susceptibles d'interprétation l'une par rapport à l'autre que pour autant que l'on tienne compte de la courbe caractéristique de la perméabilité du fer et des conditions des mesures.

Pour la facilité et l'usage général, la seconde définition de Sumpner est probablement la meilleure à adopter.

Le coefficient de self-induction est par conséquent le rapport entre l'induction totale à travers un circuit et l'intensité du courant produisant cette induction. Supposons qu'une hélice formée de cinq tours de fil soit traversée par un courant de deux unités ; que 1000 lignes d'induction traversent la spire centrale et que par suite de pertes, 900 lignes seulement traversent les spires voisines, puis 800 seulement les deux dernières spires, le nombre total de lignes d'induction est :

$$1000 + 900 + 900 + 800 + 800 = 4400$$

et, par conséquent, le coefficient de self-induction est égal à $\frac{4400}{2} = 2200$ centimètres.

Si nous supposons que l'hélice a été enroulée sur un noyau en fer, le nombre total de lignes de force peut être augmenté dans un rapport assez considérable, soit 20 fois par exemple ; il devient donc 88000 pour un courant de deux unités. Le coefficient de self-induction d'après la même règle serait égal à 44000 centimètres, mais cette règle n'est plus applicable ; il faut, pour avoir le nombre exact, tenir compte de la courbe caractéristique du noyau en fer et de son degré de saturation.

Il peut paraître anormal, à première vue, d'évaluer les coefficients de self-induction en centimètres alors qu'ils sont les quotients d'un nombre de lignes de force par une intensité de courant, mais il faut se rappeler que le nombre total de lignes de force, exprimé en unités CGS électromagnétiques, est donné par la formule :

$$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$$

et l'intensité du courant dans le même système par

$$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$$

On voit que le quotient est bien exprimé en unités de longueur ou centimètres.

Le coefficient d'induction mutuelle de deux circuits est le rapport de l'induction totale à travers l'un d'eux à l'intensité du courant dans l'autre produisant cette induction. Supposons deux bobines de fil en cuivre, situées dans un espace ne contenant aucune substance magnétisable. Soit une de ces bobines traversée par un courant de 4 unités et toutes les lignes de force produites, 500 par exemple, passant à travers l'autre bobine. Pour fixer les idées, admettons que cette dernière soit formée de 8 spires et qu'il n'y ait aucune ligne de force perdue; dans ce cas, il y aura $4000 = 500 \times 8$ lignes de force traversant la seconde bobine; $\frac{4000}{4} = 1000$ centimètres représente le coefficient d'induction mutuelle. Il est évident qu'on aurait trouvé la même valeur en calculant le nombre de lignes de force dans la première bobine et divisant par l'intensité du courant dans la seconde.

Jusqu'à présent, on a considéré le centimètre ou unité absolue; celle-ci ne peut être choisie comme unité pratique; l'auteur propose d'adopter pour cette dernière le mot « Henry ». Dans le système d'unités pratiques actuellement en usage l'unité d'inductance doit être 10^9 centimètres, ou approximativement le quart du méridien terrestre.

En 1887, dans une note lue devant la *British Association*, MM. Ayrton et Perry faisaient connaître le Secohmètre, instrument pratique pour la mesure des coefficients d'induction, et proposaient pour l'unité d'inductance le nom « Secohm », contraction de seconde-ohm. Il faut remarquer cependant que le Congrès des Electriciens tenu à Paris en 1881 avait défini l'ohm légal comme la résistance, à 0°C , d'une colonne de mercure de 1^{m} carré de section et de 106 centimètres de longueur, alors que l'ohm vrai selon toute probabilité serait représenté par une colonne de mercure de 106,3 centimètres de longueur, soit à peu près $1/4$ de 1 % plus grand.

Donc l'inductance mesurée comme le proposaient Ayrton et Perry et déduite de la seconde et de l'ohm légal, serait exprimée par des quadrants terrestres légaux de 9778 kilomètres de longueur.

Le Congrès de Paris a adopté le *quadrant* ou 10^9 centimètres comme unité pratique de coefficient d'induction. M. Kenneby dans sa note lue au meeting de « l'American Institute of Electrical Engineers », propose le « Henry » et ses subdivisions, comme l'indique le tableau suivant :

NOMS PROPOSÉS	LONGUEUR	NOMBRE DE CENTIMÈTRES	UNITÉ
Henry	Quadrant terrestre	1.000.000.000	Unité pratique
		100.000.000	
		10.000.000	
		1.000.000	
Milli Henry	Myriamètre	100.000	Unité absolue
	Kilomètre	10.000	
	Hectomètre	1.000	
Micro Henry	Décamètre	100	
	Mètre	10	
	Décimètre	1	
	Centimètre		

Dans ce qui suit M. Kenneby fait usage de ces unités.

Les plus petits coefficients de self-induction connus sont, peut-être, ceux des résonnateurs dont Hertz fait usage dans ses expériences. Dans certains instruments de mesure construits précisément dans le but de pouvoir négliger l'induction (bobines à double enroulement), l'inductance quoique beaucoup plus importante descend cependant à l'ordre des décamètres ou micro Henry. A l'autre extrémité de l'échelle, dans le cas de machines à champ magnétique dense, avec un grand nombre de tours de conducteur, l'inductance peut être égale à plusieurs centaines ou milliers de Henrys.

Intermédiairement, entre ces limites, on trouve une classe de circuits, à beaucoup de tours et peu de fer, dont l'inductance peut s'évaluer en milli Henrys ou myriamètres.

Afin, dit M. Kenneby, de mettre en relief les avantages des dénominations proposées, donnons quelques valeurs de coefficients d'induction en adoptant ces unités. Ces valeurs sont déduites d'un grand nombre d'observations. Ce sont des chiffres moyens.

En télégraphie, le coefficient de self-induction d'un relai ordinaire de la Western Union de 140 ohms de résistance est de 3 Henrys environ quand l'armature est soulevée et de 9 Henrys si l'armature est en contact avec les pôles. Dans ce cas, la réductance magnétique (inverse de la perméabilité magnétique) ou la résistance magnétique du circuit en fer est très minime et la même intensité de courant dans les bobines produit trois fois autant de lignes de force qui traversent le fer. Dans la position ordinaire de l'armature la self-induction est de 4 Henrys environ.

La self-induction d'un relai ordinaire de 10 ohms de résistance est de 200 à 500 milli Henrys selon la position de l'armature par rapport aux noyaux de bobines.

La self-induction d'un Saunder ordinaire est de 25 à 50 milli Henrys. Toutes ces valeurs sont obtenues par un courant de 4 milliampères. Elles varient, comme nous l'avons dit, avec l'intensité du courant. Pratiquement la variation est assez faible dans la limite des intensités de courants pour lesquelles ces appareils fonctionnent habituellement.

Télégraphie sous-marine. — Le coefficient de self-induction d'un galvanomètre à miroir du type ordinairement employé, ayant 2250 ohms de résistance est de 5,6 Henrys.

Téléphonie. — Les coefficients de self-induction trouvés pour les appareils ordinairement employés dans la téléphonie à longue distance sont les suivants.

Sonnerie d'appel : 80 ohms et 1,4 Henry. L'induit de la magnéto 550 ohms est de 2,7 à 7,3 Henrys suivant la position des spires par rapport à la ligne qui joint les

pôles des aimants inducteurs. Le circuit primaire de la bobine d'induction 0,28 ohm est 734 milli Henrys. Coefficient d'induction mutuelle 60 milli Henrys.

Le téléphone Bell récepteur 75 ohms et 75 à 100 milli Henrys. L'éloignement du diaphragme du récepteur réduit la self-induction de 35 % environ. Toutes ces valeurs sont obtenues pour des courants de 4 milli-ampères.

Quant aux coefficients d'induction des lignes aériennes, il est à regretter que des mesures directes n'aient pas encore été entreprises (1). La détermination expérimentale de ces coefficients offre quelques difficultés par suite de la capacité électro-statique et de l'isolement imparfait des lignes.

La théorie indique que les coefficients d'induction des circuits aériens en cuivre dépendent surtout de leur hauteur au dessus du sol et de leur diamètre. Dans le cas de conducteurs en fer la perméabilité magnétique de ce métal entre comme facteur additionnel.

La table suivante donne les coefficients d'induction, par kilomètre, des lignes aériennes en cuivre pour différents diamètres et certaines hauteurs des fils au dessus du sol. Cette table est basée sur une formule indiquée par Clerk Maxwell.

Inductance des lignes aériennes en cuivre, par kilomètre, pour différents diamètres et certaines hauteurs au dessus du sol.

Diamètre du conducteur en millimètres	Hauteur du fil au dessus du sol : 4 mètres <i>Inductance en milli-Henry ou millième de quadrant par kilomètre</i>	Hauteur du fil au dessus du sol : 7 mètres <i>Inductance en milli-Henry ou millième de quadrant par kilomètre</i>	Hauteur du fil au dessus du sol : 10 mètres <i>Inductance en milli-Henry ou millième de quadrant par kilomètre</i>	Hauteur du fil au dessus du sol : 13 mètres <i>Inductance en milli-Henry ou millième de quadrant par kilomètre</i>
10	1.986	2.109	2.170	2.222
20	1.848	1.960	2.031	2.083
30	1.765	1.878	1.950	2.002
40	1.709	1.821	1.892	1.945
50	1.664	1.776	1.847	1.900
60	1.628	1.740	1.811	1.863
70	1.596	1.709	1.780	1.833
80	1.570	1.682	1.754	1.806
90	1.547	1.659	1.730	1.783
100	1.526	1.633	1.709	1.761

(1) Voir Annales télégraphiques (1890).

Dans le cas de conducteurs en fer, la difficulté consiste à assigner à la perméabilité magnétique du métal sa véritable valeur ; le coefficient de self-induction est 10 fois (et peut être davantage) plus élevé que celui d'un conducteur en cuivre placé dans les mêmes conditions.

Dynamos et transformateurs. — Les machines dynamo-électriques sont caractérisées par des coefficients d'induction fort élevés. L'inductance du champ magnétique d'une dynamo dépend des dimensions et du voltage de la machine : elle peut varier de 1 à 900 Henrys.

Le coefficient d'induction propre de l'armature varie de 25 à 50 Henrys entre les balais. Ce coefficient dépend non seulement de l'intensité du courant mais aussi de l'intensité du champ et de tout ce qui peut influer sur la perméabilité magnétique du noyau.

Les coefficients d'induction d'un transformateur pour courants alternatifs dont le rapport de transformation est 20, varient, pour le primaire, de 400 milli Henrys, pour le secondaire de 1 milli Henry, et pour le coefficient d'induction mutuelle de ces deux circuits, de 20 milli Henrys à des valeurs cent fois plus élevées peut-être.

Appareils divers ; Bobines de Ruhmkorff. — La plus petite bobine médicale d'un usage ordinaire a 5 milli Henrys pour coefficient de self-induction du circuit primaire, 100 milli Henrys pour le circuit secondaire et 20 milli Henrys pour coefficient d'induction mutuelle.

Une grande bobine d'induction de 19 pouces (0^m482) de longueur et de 8 pouces (0^m203) de diamètre a, comme coefficients de self-induction, pour le primaire 13 milli Henrys (0,145 ohm de résistance), pour le secondaire 2000 Henrys (30600 ohms de résistance). Le coefficient d'induction mutuelle égale 163 Henrys. La self-induction d'un galvanomètre à miroir peut varier de quelques milli Henrys jusqu'à 10 Henrys et davantage, suivant la résistance. Pour un galvanomètre à miroir, astatique,

d'une résistance de 5000 ohms, la valeur moyenne est de deux Henrys.

Il y a un point assez important, sur lequel il faut attirer l'attention, c'est la relation qui existe entre le coefficient d'induction mutuelle et les coefficients de self-induction dans les bobines d'induction et les transformateurs.

Supposons un anneau fermé en fer, de 100 centimètres de circonférence moyenne, de 20 centimètres carrés de section transversale; recouvrons le d'une première couche formée de 2500 tours de fil isolé, constituant le circuit primaire. Sur cette première couche disposons en une seconde de 7500 tours de fil isolé, formant le circuit secondaire. Supposons qu'un courant de deux ampères traverse le circuit primaire.

Si on néglige l'espace occupé par le conducteur primaire, le nombre total de lignes de force traversant les spires de ce circuit sera donné par

$$\frac{4\pi \times 2 \times 2500 \times 250 \times 20}{10 \times 100} \times 2500$$

en prenant 250 pour la perméabilité magnétique du fer soit environ 786.000.000, en divisant par l'intensité du courant on trouve pour le coefficient de self-induction 393.000.000 centimètres soit 0,393 Henrys ou 393 milli Henrys.

Le nombre total de lignes de force traversant les spires du circuit secondaire est

$$\frac{4\pi \times 20 \times 2 \times 2500 \times 250}{10 \times 100} \times 7500,$$

soit environ 2.358.000.000; pour l'induction mutuelle entre les deux circuits on trouve 1.179.000.000 centimètres, soit 1,179 Henry.

Supposons que le courant dans le circuit primaire soit interrompu et qu'un courant soit établi dans le circuit secondaire pour produire la même force magnétique dans

le fer. Cette hypothèse évite la complication d'un changement de perméabilité magnétique. Le circuit secondaire ayant trois fois plus de tours que le circuit primaire, un courant de $\frac{2}{3}$ ampère donnera la même induction totale à travers le fer que précédemment ; le nombre de lignes de force sera donc le même, soit 2.358.000.000 pour le circuit secondaire, ce qui donne comme coefficient de self-induction : $\frac{2.358.000.000 \times 3}{2} = 3,537$ Henrys, et 786.000.000 pour le circuit primaire, d'où on conclut que le coefficient d'induction mutuelle entre les deux circuits est $786.000.000 : \frac{2}{3} = 1,179$ Henry ; c'est la valeur trouvée précédemment.

En poussant le calcul à un certain degré d'exactitude, on trouve que le coefficient d'induction mutuelle 1.179 est la racine carrée du produit des deux coefficients de self-induction 0.393×3.537 .

L'examen de la marche du calcul montre que cette proposition doit être adoptée pour tous les circuits magnétiques fermés, uniformément magnétisés, l'espace occupé par les enroulements n'entrant pas en ligne de compte.

Dans le cas d'anneaux courts, en fer, ouverts, avec de grands espaces d'enroulement, les conditions ne sont plus les mêmes ; le coefficient d'induction mutuelle peut être plus grand ou plus petit que la racine carrée du produit des coefficients de self-induction.

Une autre raison qui milite en faveur du choix de 1.000.000.000 centimètres comme unité pratique des coefficients d'induction, c'est qu'il permet d'exprimer en secondes et non en multiples ou sous-multiples de la seconde la constante de temps (time constant) autrement dit le rapport de la self-induction d'un circuit à la

résistance de ce circuit $\left(\frac{L}{R} = T\right)$.

La constante de temps d'un circuit électro-magnétique ayant une certaine résistance et un coefficient de self-induction, mais dont la capacité électro-magnétique est faible, peut être définie comme le rapport de la self-induction à la résistance, c'est-à-dire, comme le rapport d'un nombre de Henrys à un nombre d'ohms.

Soit une bobine sans fer traversée par un courant produit par une force électro-motrice de 50 volts ; supposons que la résistance du circuit est de 10 ohms et son coefficient de self-induction de 3 Henrys. L'intensité du courant qui traverse la bobine est de 5 ampères. Si on shunte la bobine, en reliant ses deux extrémités par un conducteur de résistance négligeable, le courant dans la bobine ne cessera pas immédiatement ; comme la théorie l'indique, il n'aura une valeur nulle qu'au bout d'un temps infini.

La quantité totale d'électricité qui traverse la bobine, dans ces conditions, peut être appelée la décharge de la bobine. Cette décharge est égale à la quantité d'électricité transmise par un courant dont l'intensité est la même que celle du courant initial de décharge (5 ampères dans le cas qui nous occupe) pendant un temps égal à la constante de temps du circuit $\left(\frac{L}{R} = \frac{3}{10} = 0.3 \text{ seconde}\right)$; Cette décharge totale est donc $0.3 \times 5 = 1,5$ coulomb.

La même loi s'applique à la décharge d'un circuit de résistance R mais dont le coefficient de self-induction est négligeable, seulement la constante du temps est dans ce cas égale à la capacité multipliée par la résistance du circuit. ($CR = T$).

Les courbes de décharge obtenues, pour les condensateurs et les bobines à self-induction, en portant sur l'axe des abscisses les temps exprimés en secondes, et comme ordonnées les intensités de courant sont toutes du type logarithmique.

Des courbes semblables, mais de sens inverse, existent pour la charge d'un condensateur et l'établissement d'un courant dans un circuit à self-induction. Il faut toutefois remarquer que le circuit électro-statique doit être exempt de toute self-induction et que le circuit électro-magnétique ne doit avoir qu'une capacité électro-statique négligeable.

D'autres analogies existent encore entre l'inductance et la capacité.

Dans un certains nombre d'applications, notamment en télégraphie, on utilise les propriétés des courants de décharge des condensateurs et des électro-aimants en disposant ces appareils de façon que leurs effets s'annulent réciproquement.

La constante de temps d'un circuit à self-induction est généralement faible, parce que pour avoir une grande self-induction il faut beaucoup de tours de conducteur ; mais en multipliant les spires, la résistance croît et le rapport des Henrys aux ohms devient assez faible.

La constante de temps d'un récepteur Bell, est, d'après certaines mesures, de 0.09 : 75 ou 0.0012 de seconde. Une force électro-motrice de 2 volts, agissant directement sur un tel téléphone, produirait, au bout de cet intervalle de temps, un courant égal à 63,2 % de $\frac{2}{75}$ ampère, soit 0.0169 ampère.

Il y a plusieurs méthodes pour la mesure des coefficients de self et de mutuelle induction. Le choix dépend de la grandeur à déterminer et de sa nature. L'une des méthodes souvent employée est celle du secohmètre d'Ayrton et Perry. On peut l'employer soit avec un condensateur étalon, soit avec une self-induction étalon.

Pour de petites inductances, inférieures à $\frac{1}{10}$ milli Henry, la méthode du professeur Hughes ou sa modification par Lord Rayleigh est probablement la meilleure à suivre : on fait usage de deux bobines d'induction mutuelle et d'un téléphone comme instrument d'observation.

Les bobines d'induction ordinairement employées ont la forme de deux anneaux concentriques dont l'intérieur peut tourner autour d'un axe vertical. L'inductance mutuelle d'une telle paire de bobines est une fonction complexe de leurs dimensions et de l'angle qu'elles font entre-elles. On peut tarer l'instrument en mesurant l'induction mutuelle des deux bobines sous des angles différents.

Un arrangement simple pour l'induction mutuelle est un solénoïde court dans le circuit du pont, superposé coaxialement à un solénoïde long dans le circuit de la batterie.

On obtient le silence dans le téléphone, pour des courants interrompus, en insérant dans le circuit du pont un nombre plus ou moins grand de tours du solénoïde. L'induction mutuelle est alors proportionnelle au nombre de tours insérés et l'on peut, par des proportions convenables dans la construction des bobines, pousser l'exactitude aussi loin que le permet le récepteur téléphonique employé comme instrument de mesure.

On peut faire usage du galvanomètre balistique. M. Kenneby expose ou plutôt rappelle quelques méthodes qui peuvent être essayées.

L'auteur passe ensuite au choix du symbole pour la représentation des unités choisies. Il serait tout disposé à admettre la lettre H pour le Henry et la minuscule *h* pour le milli-Henry.

Tel est le résumé assez complet de la note de M. Kenneby. Il est inutile, pensons-nous, de faire remarquer que le Congrès des Electriciens, tenu à Paris en 1889, a adopté comme unité pratique de coefficient d'induction le quadrant qui vaut 10^9 centimètres.

L'auteur a exprimé l'espoir que des essais de mesure des coefficients d'induction soient faites sur les lignes télégraphiques. L'administration française a fait quelques tentatives, sans succès, sur les fils Bruxelles-Paris. Le

voisinage de conducteurs qui ne sont jamais silencieux et la délicatesse des expériences empêchèrent les essais d'aboutir. Depuis, d'autres expériences furent entreprises sur deux fils Epernay-Montmort et Epernay-Congy, ce dernier coupé à Montmort. Dans les annales télégraphiques de 1890 (n° de novembre-décembre) M. Massin relate ces expériences. Il a trouvé pour la self-induction d'un fil de fer de 3^m/_m de diamètre placé à 4^m50 au dessus du sol, une valeur $L = 0,22$ pour une longueur de 18^{km}200, soit 0.012 par kilomètre. Cette valeur dans le cas d'un fil de cuivre de 3^m/_m placé à 4 mètres au dessus du sol, serait d'après la table de Kenneby de 0,001765 quadrant par kilomètre, soit environ 7 fois moins que la self-induction d'un fil de fer placé dans des conditions à peu près les mêmes. M. Massin faisait usage d'une pile de 12 éléments Callaud ; la résistance des deux conducteurs bouclés à Montmort était de 654 ohms. La méthode qu'il a employée est celle indiquée par M. Vaschy dans son traité d'électricité et de magnétisme (p. 272 et 381).

ROOSEN.

La construction des étalons de résistance électrique de l'administration physico-technique impériale, par le Docteur K. FEUSNER.

L'étalon original de l'ohm est réalisé par un conducteur de mercure. L'administration impériale en a déduit toute une série de résistances, s'étendant depuis 100000. jusque 0,0001 ω . Celles-ci sont bien isolées, pour servir à l'étalonnage d'autres résistances ou bien mises dans des boîtes de résistance, pour être employées dans le cas où une résistance réglable est requise. Parmi les résistances isolées, les plus faibles, qui servent à mesurer de grandes intensités de courants, doivent présenter de plus grandes surfaces de rayonnement. A partir de 0,1 ω et au dessus, les résistances isolées offrent à peu près les mêmes dimensions. C'est de celles-là qu'il va être question ; on s'occupera des autres dans des communications ultérieures.

I. *Les grandes résistances isolées.* — La résistance de 100ω peut être considérée comme le type des résistances isolées comprises entre $0,1\omega$ et 10000ω . Dans toutes, le fil de résistance est en nickel breveté (Patent nickel; voir Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1889, p. 233); il est enroulé en une ou deux couches sur un cylindre de laiton de $40 \text{ }^m/m$ de diamètre. L'enroulement a une hauteur de $50 \text{ }^m/m$; il est surmonté d'un espace libre, haut de $10 \text{ }^m/m$, et entouré d'une couronne percée de larges ouvertures permettant la circulation de l'huile minérale qui remplit l'appareil. Avant et après l'enroulement, le cylindre est enduit de gomme-laque, puis séché pendant plusieurs heures à la température de 130° . Les extrémités du fil sont soudées à l'argent avec de petits disques en cuivre vissés et soudés aux conducteurs de cuivre, constitués par des fils courbés, de $7 \text{ }^m/m$ de diamètre; chacun de ces conducteurs est de $0,00005\omega$; ils traversent le couvercle de gomme-laque de la boîte, auquel ils sont solidement fixés. Les extrémités recourbées de ces conducteurs plongent dans des godets à mercure, en cuivre massif, qui servent à établir les connexions pendant les mesures.

Le tableau ci-joint indique les dimensions du fil dans les divers appareils.

Les résistances doivent autant que possible atteindre à 20° , leur valeur assignée. Pour les neuf premières résistances, afin de faciliter le montage et de corriger les erreurs difficiles à éviter, on a majoré de $0,1$ la longueur des fils, quitte à ajouter un shunt convenable. Afin d'éviter, dans les résistances de 5 à 10ω l'emploi de shunt embarrassant, on peut, ou bien shunter une partie seulement du fil, ou bien terminer le fil par une portion de fil plus fort que l'on coupe ensuite à la longueur convenable.

On peut négliger, pour les appareils de 1ω et au dessus, la variation de résistance des conducteurs de cuivre avec la température ou avec le plus ou moins de profondeur de

mercure dans les godets. Pour les appareils plus faibles, ces conducteurs ont un diamètre de 10 m/m et le niveau du mercure est repéré. Pour les résistances de 1000 à 10000 ω , outre les contacts à mercure, on emploie des vis de pression.

Les soudures sont soigneusement faites, en évitant d'employer un excès d'argent qui pourrait nuire à leur précision. Tous les alliages de nickel se laissent difficilement étamer, surtout lorsqu'on renonce à l'emploi d'eau de soudure, comme c'est ici le cas. Il arrive, même en employant les plus grandes précautions, que l'étamage se fendille et que la résistance augmente notablement. C'est pour éviter ces inconvénients qu'on emploie la soudure à l'argent.

La nature même de la substance employée comme résistance était une cause d'erreurs, aussi longtemps qu'on employait des alliages contenant du zinc. Des recherches faites par l'administration (1889 p. 285) ont montré qu'il faut leur préférer des alliages libres de zinc ; tel est le nickel breveté (Patentnickel) qui sert aussi à la fabrication de la monnaie impériale ; il renferme 75 % de cuivre et 25 % de nickel.

Des études récentes ont démontré que le cuivre au manganèse lui était encore préférable ; sa constance au point de vue de la résistance est à peu près la même ; et, en outre, les variations de sa résistance dans les limites ordinaires de température sont 10 fois moindre que pour aucune autre substance employée jusqu'à présent dans la confection des fils. Il est à espérer que le cupro manganèse remplacera le nickel breveté, dans ces sortes d'appareils.

Afin de pouvoir déterminer la résistance du nickel breveté, jusqu'au cent millième de sa valeur, il faut connaître la température du fil jusqu'au 0,05 de degré près. Afin de favoriser la communication de la chaleur du fil, l'enroulement ne se fait que sur une ou deux couches ; la bobine est placée, avec un thermomètre

marquant les vingtièmes de degré dans un liquide isolant, et mobile : ces précautions réduisent l'échauffement au cinquième ou au sixième de la valeur qu'il atteint dans les boîtes de résistance ordinaires. On a choisi comme liquide le pétrole exempt d'acidité. Les gros conducteurs de cuivre plongent de 1^{cm} dans le pétrole. La mobilité du liquide est assurée grâce à un tube de verre qui pénètre dans l'appareil à côté du thermomètre, et par lequel on insuffle un courant d'air.

Valeur assignée en ω	FIL PRINCIPAL			FIL DÉRIVÉ (ou fil supplémentaire)		
	Résistance en ω	Diamètre en 0,001 cm.	Longueur en cm.	Résistance en ω	Diamètre en 0,001 cm.	Longueur en cm.
			(1)			
0.1	0.101	160	125 × 2	10	40	394
0.2	0.202	200	186	20	24	286
0.5	0.505	160	311	50	14	235
1	1.01	100	241	100	14	470
2	2.02	100	482	200	10	620
FIL SUPPLÉMENTAIRE						
5	4.99	70	600	0.01	160	6
10	9.99	50	581	0.01	160	6
20	19.98	50	1162	0.02	160	12
50	49.95	40	1970	0.05	100	12
100	100	24	1430			
200	200	24	2860			
500	500	17	3450			
1000	1000	14	4700			
2000	2000	10	6200			
5000	5000	7	8200			
10000	10000	6	10000			

COLARD.

Alliages métalliques pour résistances électriques,
par le Docteur K. FEUSNER et le Docteur LT. LINDECK.
(Communication de l'administration physico-technique
impériale). — Les métaux purs donnent en général un
coefficient de température de 0,04 environ par degré.

(1) On a inséré parallèlement deux fils de 125 cm. de longueur.

Les alliages présentent des coefficients en général plus faibles. Ainsi, le nouvel argent (3 de cuivre, 2 de zinc et 1 de nickel), a un coefficient dix fois plus faible que les métaux purs.

Nous donnons ici les résultats des essais effectués à ce point de vue sur 8 fils de natures différentes. Nous réservons pour une communication ultérieure la description des méthodes de mesure employées.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	Argent neuf	Nickelino d'Obermaier A) Diam. 1,0 m/m	B) Diam. 0,1 m/m	Rheotan	Nickel breveté A) Diam. 0,6 m/m	B) Diam. 1,0 m/m	Capro- Manganèse	Cuivre au nickel et au manganèse
Composition	Cu	60.16	61.63	54.57	53.28	74.41	74.71	73
	Zn	25.37	19.67	20.44	16.89	0.23	0.52	—
	Sn	—	—	—	—	Traces	—	—
	Ni	14.03	18.46	24.48	25.31	25.10	24.14	3
	Fe	0.30	0.24	0.64	4.46	0.42	0.70	—
	Co	Traces	0.19	—	Traces	Traces	—	—
	Rn	Traces	0.18	0.27	0.13	0.17	30	24
Résist. spécif. (en microhms/cm ²)	99.86	100.37	100.40	100.31	100.29	100.24		
Coeff. de températ.	30.0 0.00036	33.2 0.00030	44.8 0.00033	52.5 0.00041	34.2 0.00019	32.8 0.00021	100.6 0.00034	47.7 — 0.00033

Le fil I a été employé jusqu'ici par MM. Siemens et Halske dans la confection de leur étalon de résistance.

La résistance était très variable avec certaines circonstances ; par exemple, l'enroulement sur un cylindre d'un diamètre égal à dix fois l'épaisseur du fil augmentait la résistance de 0,01 de sa valeur. De plus, même quand le fil était laissé au repos, la résistance augmentait avec le temps. La variation de résistance avec la température n'est pas indépendante de la plus ou moins grande rapidité de l'échauffement. Il s'ensuit que cette substance n'est pas apte à l'emploi que l'on en a fait. C'est pourquoi l'on a essayé d'autres alliages. Il y avait deux conditions à réaliser : constance de la résistance spécifique ;

valeur faible du coefficient de température. Les fils II et III ne se sont guère montré meilleurs que le fil I à ces divers points de vue. Le fil III paraît présenter les mêmes propriétés ; cependant, le manque de fil de gros-seur convenable n'a pas permis d'expérimenter complètement la constance de la résistance.

Nous sommes tentés d'attribuer ces propriétés spéciales à la circonstance que voici. Les fils d'abord amorphes tendent à reprendre peu à peu l'état cristallin ; cette tendance serait surtout marquée dans les alliages riches en zinc. Le remède consisterait donc à remplacer dans les alliages le zinc par d'autres substances, ou encore à le supprimer simplement.

On voit, par les tables V et VI, que le nickel breveté présente un coefficient de température deux fois plus faible que les fils précédents. Un enroulement de ce fil, soumis d'abord à une température de 150°, ne présente plus de variations irrégulières permanentes lorsqu'on le chauffe ensuite jusque 100°. Cette régularité semble caractériser les alliages exempts de zinc, ou à peu près. Jusqu'à présent, le nickel breveté semble être l'alliage que l'on doit employer de préférence pour constituer les fils de résistance.

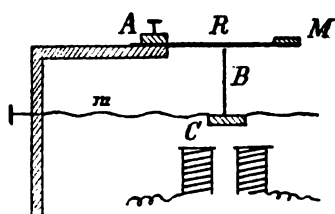
Notre attention s'est ensuite portée sur les alliages au manganèse, nouvellement introduits par les usines Isabelle près de Dillenburg, et cela d'autant plus que M. Weston avait trouvé pour ces fils un coefficient de température négatif. Nous avons fait faire, d'après nos indications, des alliages de cette espèce. Pour des essais préliminaires, nous avons détaché de barres coulées à l'usine ci-dessus, des bandes que nous avons ensuite tirées en fils. Le métal est très tenace et se laisse bien tirer ; il se laisse aussi très bien mordre par la scie. Le métal VII est gris d'acier ; le métal VIII est rose pale. Les chiffres donnés dans les tables ne sont que provisoires. Le coefficient de température pour les deux alliages est extrêmement faible, et est

en effet négatif pour le second. En outre, la grande résistance spécifique du cupro, manganèse est très remarquable.

Cette substance présente donc une indépendance à peu près complète vis à vis de la température. On pourrait la rendre plus indépendante encore, en effectuant un mélange convenable des alliages VII et VIII. C'est une étude que nous nous proposons de faire. Nous nous efforcerons aussi de réaliser des alliages présentant des coefficients de température plus considérables, et négatifs.

COLARD.

Un nouvel appareil pour la mesure des courants continus ou alternatifs: *Le Téléphone optique*, de M. MAX WIEN. — Les annales de Wiedemann (vol. 42, p. 593 621) donnent la description de cet appareil ingénieux. Il comprend une membrane téléphonique m , en



argent neuf, mince, ondulée analogue à celle que l'on emploie dans les baromètres anéroïdes; d'un côté, elle porte une petite plaque de fer doux C , sollicitée par un électro-aimant excité par le courant à mesurer; de

l'autre côté, elle est munie d'une pointe B qui s'appuie sur une pièce très-délicate R , constituée par un morceau de ressort de montre encastré en A et pourvu à son extrémité d'un miroir M . Les lectures se font par réflexion. On fait tomber sur ce miroir un faisceau lumineux qui est renvoyé sur une échelle graduée.

Si un courant permanent traverse la bobine, le ressort se plie et l'on obtient à l'échelle une déviation permanente proportionnelle à l'intensité du courant.

Dans le cas où un courant alternatif traverse la bobine, on n'obtient plus de déviation permanente, mais bien des

vibrations très-rapides du trait lumineux, qui font apparaître celui-ci sous la forme d'une bande dont la largeur est proportionnelle à l'amplitude du courant alternatif.

Pour que la bande soit le plus large possible, il importe de faire en sorte qu'il y ait résonnance entre la membrane, le ressort et le courant. Dans les expériences décrites par l'auteur, on commence par choisir la membrane, dont le son propre dépend essentiellement du poids de la plaque en fer doux; puis, en encastrant le ressort plus ou moins près de son extrémité, on fait varier sa durée d'oscillation jusqu'à l'amener à être d'accord avec la membrane. On a employé pour cela un accordoir. Aux moments où l'accordoir donnait les sons propres de la membrane et du ressort, on constatait des maxima dans la largeur de la bande lumineuse; en agissant sur l'encastrement du ressort, on amenait ces deux maxima à se superposer. Restait à mettre le courant alternatif à mesurer d'accord avec la membrane et le ressort. Ce courant était le courant secondaire d'une bobine d'induction à noyau de fer doux; le primaire était un courant continu, interrompu à intervalles égaux par une corde de fer plus ou moins tendue. Cette corde porte une pointe de cuivre qui a chacune de ses vibrations émerge d'un godet à mercure et interrompt ainsi le courant primaire. Le mouvement de la corde est entretenu par un électro-aimant excité par un accumulateur; le courant d'excitation est aussi interrompu à chaque vibration de la corde. On peut faire varier à volonté la période du courant alternatif secondaire en tendant convenablement la corde. (Il va sans dire que, en pratique, pour mesurer un courant alternatif sinusoïdal de période donnée, on devra procéder dans un ordre inverse et accorder la plaque et le ressort avec le courant.)

On a constaté par expérience que les déviations étaient beaucoup plus fortes (cent fois environ) pour les courants alternatifs consonnants avec la membrane et le ressort, que pour les courants dissonnants. On peut ainsi arriver

aisément à évaluer séparément les courants alternatifs de longueur d'onde déterminée traversant un conducteur; l'influence des courants de longueur d'onde différente devenant négligeable. L'appareil peut donc servir comme analyseur.

En ce qui concerne la sensibilité de l'instrument, on a constaté qu'une déviation d'une division de l'échelle correspondait à un courant de 0,6 micro-ampère; si on part du repos, le trait lumineux se trouvant d'abord au zéro, on peut constater sans peine le passage d'un courant de 0,01 micro-ampère. Le dynamomètre employé par M. Wien donnait une déviation d'une division par micro-ampère, et il n'y avait aucun avantage à partir de la position de repos.

Des mesures faites sur des résistances sans self-induction ont montré expérimentalement que les erreurs dues à l'emploi du dynamomètre étaient de 0,11 %, contre 0,012 %, dans l'emploi du téléphone optique. En outre, le téléphone permet de faire facilement dix lectures en trois à quatre minutes; les lectures au dynamomètre sont plus lentes et plus pénibles, ce qui augmente les chances d'erreurs.

Somme toute, d'après le rapport de M. Wien, les principaux avantages du nouvel appareil sont les suivants :

1° Grande sensibilité; 2° possibilité d'analyser un groupe de courants alternatifs superposés; 3° facilité et rapidité des lectures; 4° indications proportionnelles.

COLARD.

Quelques points sur le calcul des chemins de fer électriques (*Günther Z. fur. Elektr. Wien*). — Lors de la rédaction d'un projet de chemin de fer électrique, il est nécessaire d'avoir une idée du rapport qui existera entre les dépenses et les recettes de la ligne.

Parmi les nombreuses formules données à cette fin, celle de Plesner correspond le mieux aux besoins de la pratique.

Soient E_B les recettes par kilom. en marks.

M le nombre d'habitants par kilom. carré.

b » » de la station de départ.

t la distance kilométrique des stations extrêmes.

d la distance moyenne du transport des marchandises.

P le tarif par voyageur-kilomètre.

T » tonne-kilomètre.

L la longueur kilométrique de la ligne; on a alors

$$1) \quad E_B = \frac{1.1}{80} \frac{M}{L} \left[mP \times \sum (b \times t) + nT \sum (b \times d) \right]$$

Pour cette formule, m et n sont des coefficients dont les valeurs sont prises selon les circonstances; ainsi

a) Dans les centres de culture et d'élève de bestiaux.

$m = 7$ voyageurs, par tête d'habitant, par an et station.

$n = 1.5$ tonne » » » » »

b) Dans les contrées industrielles et agricoles.

$m = 10$ $n = 2.5$

c) Dans les contrées très industrielles

$m = 12$ $n = 3$ à 4

Désignant par n le parcours kilométrique annuel, évaluant les frais du personnel, exploitation, entretien de stations et voie à $6000 \sqrt{L}$; les frais de direction à $4000 + 200 L$; le service du capital de réserve: $0.08 E_B$; la dépense annuelle par kilomètre sera

$$2) \quad A = \frac{\alpha h + 6000 \sqrt{L} + (4000 + 200 L) + E_B}{L} \text{ marks}$$

par année.

Pour le coefficient α , nous prenons :

$\alpha = 0.4$ lors que les rampes maximum sont de 10 ‰

$\alpha = 0.6$ » » » » 10 à 25 ‰

$\alpha = 0.7$ » » » plus de 25 ‰

Un autre point important est la détermination du travail des machines. Il y a différentes formules données par divers auteurs, qui toutes ont le défaut de ne pas tenir compte des courbes.

Désignons par

L le poids de la locomotive en tonnes.

G » des véhicules (voitures et wagons) en tonnes.

M = G + L, le poids total.

V la vitesse en kilomètres par heure.

N_{*} le travail des moteurs en chevaux.

γ le rendement % du moteur
 γ₁ » » générateur
 γ₂ » de la conduite

} en nombres entiers

s rampe en millimètre par mille.

r rayons des courbes en mètres.

v vitesse en mètres par seconde.

Blackwell donne

$$3) \quad N_* = \frac{M (7.5 + s) v}{75} \text{ chev. vap.}$$

La valeur 7.5 est trop petite, sauf dans les conditions exceptionnellement favorables. Julien, Huber et Sprague remplacent 7,5 par 10 et la formule devient :

$$4) \quad N_* = \frac{M (10 + s) v}{75} \text{ chev. vap.}$$

Lorsque les rails sont doubles Huber multiplie cette valeur par 1,5.

La formule ci-après, employée en Amérique, est très différente en apparence de la précédente, mais donne les mêmes résultats que celle de Blackwell.

$$5) \quad N_* = 2 \left[0.0334 \times M \times V \left(s + \frac{10}{20} \right) \right] \text{ chev. vap.}$$

Ces formules ont le défaut de ne pas tenir compte des courbes. La suivante donne dans tous les cas un bon résultat.

$$6) \quad N_* = \frac{\left\{ c \times L + K \times G + M \left(s + \frac{750}{r} \right) \right\} V}{270}$$

Les valeurs du coefficient c sont :

c = 12 pour moteur et voiture séparés.

c = 16 » » » réunis.

$K = 1.65 + 0.05 V$ a service de marchandises et voyageurs
quand $V \leq 20$

$K = 1.8 + 0.08 V + 0.05 \frac{V^2}{G}$, quand V est compris entre 20 et 35.

Cherchons le travail à développer par les machines. A est le nombre de moteurs (ayant un rendement γ); on en conclut que

$$a) \quad a \times N_s \times \frac{100}{\gamma} \text{ chev. vap.}$$

doivent être disponibles aux balais des moteurs; aux générateurs on aura

$$b) \quad a \times N_s \times \frac{100}{\gamma} \times \frac{100}{\varphi} \text{ chev. vap.}$$

où, tenant compte de la perte en ampères-tours, etc.

$$7) \quad N_s = a N_s \times \frac{100}{\gamma} \times \frac{100}{\varphi} \times \frac{100}{\eta} = \frac{1,000,000}{\gamma \varphi \eta} a N_s \text{ ch.v.}$$

La formule (b) exprimée en watts s'écrit :

$$8) \quad N_p = \frac{7,360,000}{\gamma \varphi} a N_s \text{ watts.}$$

Il reste le calcul du conducteur; et comme le retour se fait généralement par les rails, on doit aussi évaluer la perte aux rails et calculer ensuite les sections de cuivre et de fer.

Soient :

I intensité du courant en ampères

E la *f. é. m.* en volts aux bornes du générateur

e la perte en volts.

γ le rendement du moteur (nombre entier)

l longueur de la conduite en mètres.

A le nombre des stations génératrices ou points d'alimentation.

On a alors généralement

$$9) \quad q = \frac{l \times I}{57 \times e} \text{ mm}^2 \text{ de cuivre.}$$

$$10) \quad q = \frac{l \times I}{9.67 \times e} \text{ mm}^2 \text{ de fer.}$$

La perte dans les rails sera :

$$11) \quad e = \frac{l \times I}{9.67 \times q} \text{ volts.}$$

Une autre formule très-usitée pour le calcul de la section est :

$$12) \quad q = \frac{13480 \times N_s \times l}{E (E - e) \gamma} \text{ mm}^2$$

qui suppose que la station est à une extrémité de la ligne.

Si la station se trouve au milieu, on aura :

$$13) \quad q = \frac{13480 \times N_s \times l}{4 \times E (E - e) \gamma} = \frac{3370 \times N_s \times l}{E (E - e) \gamma} \text{ mm}^2.$$

S'il y a A stations d'alimentation

$$q = \frac{13480 \times N_s \times l}{E (E - e) \gamma A^2} \text{ mm}^2.$$

Exemple : Soient deux villes A et B distantes de 20 kilomètres. Soit à 9 kilomètres de A une chute d'eau pouvant fournir 110 à 120 chevaux.

Deux trains avec une vitesse de 15 kilomètres à l'heure doivent circuler par jour dans chaque sens. Il n'y aura qu'un train à la fois sur la voie. Chaque train est composé d'une locomotive, de trois wagons de six tonnes de poids brut et d'une voiture de voyageurs pour 50 personnes pesant 5600 kilogs. Il existe une courbe d'un rayon de 150 mètres et des rampes de 2,5 ‰.

Calcul du travail du moteur. — D'après la formule (6)

$$N_s = \frac{\left\{ c \times L + KG + M \left(s + \frac{750}{r} \right) \right\} V}{270}$$

$$= \frac{\left\{ 12 \times 6 + (1,65 + 0,05 V) 23,6 + (23,6 + 6) \left(25 + \frac{750}{150} \right) \right\} 15}{270}$$

Il sera recommandable d'adopter 60 chevaux-vapeur ; le rendement du moteur sera 90 ‰.

Calcul de la conduite. — Soit la tension à l'origine 500 volts, la perte $e = 50$.

On a, pour la conduite de 11 kilomètres, d'après (12)

$$q = \frac{13480 \times N_s \times l}{E(E - e) \gamma} = \frac{13480 \times 60 \times 11000}{450 \times 500 \times 90} = 436 \text{ mm}^2$$

Pour cette partie on adopterait des conducteurs souterrains. Pour les 9 kilomètres, on aurait

$$q = 359 \text{ mm}^2$$

Calcul de la f. e. m. des générateurs. — D'après (b) on a

$$EI = N_s \times \frac{100}{\gamma} \times \frac{100}{\varphi} \times 736 \text{ watts} = 54500 \text{ watts.}$$

On choisirait trois machines de 27250 watts chacune, dont une en réserve.

Les moteurs ayant un rendement de $\eta = 87\%$ doivent produire :

$$N_B = N_s \times \frac{100}{\gamma} \times \frac{100}{\varphi} \times \frac{100}{\eta} = 85 \text{ chevaux-vapeur.}$$

On placera trois turbines de 43 chevaux chacune. Les rails ayant une hauteur de 104.6 mm. et pesant 26.1 kg. par mètre courant et d'une section de 3420 mm², la perte au retour est

$$e = \frac{l \times i}{9,67 \times 3420} = \frac{11000 \times 109}{9,67 \times 3420} = 36 \text{ volts.}$$

La perte de 10 % est de beaucoup dépassée, et on aura à choisir entre un agrandissement de la section des conducteurs et une augmentation de tension aux balais du générateur; dans ce cas, on prendra le dernier moyen.

PH. DAWSON.

Que doit être un ingénieur électricien par M. FRANCIS-B. CROCKER. — Des hommes dont l'opinion fait autorité ont dit que l'ingénieur électricien doit être surtout mécanicien. C'est l'avis de sir W. Thomson « mécanicien pour neuf dixièmes, électricien pour un dixième »; telles sont les proportions dans lesquelles les deux sciences doivent être dosées. Après eux, cet aphorisme a passé dans la bouche un peu de tout le monde; il est devenu l'opinion sinon universelle, au moins la plus répandue. Il y a pour origine ce fait que l'extraordinaire rapidité avec laquelle s'est développé

l'emploi de l'électricité pour l'éclairage et la force motrice n'a pas permis de donner des soins suffisants à l'agencement et à la construction du matériel mécanique. Ce travail est plus souvent échu à des hommes tout à fait incompétents, ou, tout au plus, à des techniciens qui n'y étaient préparés que par leurs occupations dans des bureaux de télégraphes ou des laboratoires de physique.

C'est l'histoire de la première période du développement de chaque branche de l'industrie. Les premiers qui s'y lancent sont des amateurs, des jeunes gens sans expérience, ou, ce qui est pis, des charlatans et des individus qui ont échoué dans d'autres métiers.

Mais dès que s'est écoulé le temps nécessaire pour que l'expérience ou l'éducation aient formé des hommes pour cette industrie, dès qu'étant classée elle attire des talents d'un ordre plus élevé, les éléments indispensables aux bons résultats existent en elle et s'y répartissent dans des proportions convenables et suivant les rapports voulus.

Je suis d'avis que l'industrie électrique est aujourd'hui entrée ou entrera dans un temps très prochain dans cette phase; je prétends que l'ingénieur électricien doit être *un spécialiste de l'électricité* et que la mécanique, bien que faisant nécessairement partie de son éducation, n'en est pas l'élément principal.

Je trouve une raison simple et plus que suffisante à l'appui de mon opinion dans ce fait que la partie purement électrique de la profession d'ingénieur électricien a pris un si rapide et si grand développement que personne aujourd'hui ne pourrait suivre dans tous leurs détails les progrès de l'électricité dans ses nombreuses branches, ni même trouver le temps de lire les livres et les journaux les plus importants. En fait, chacun doit à présent se conspécialiser dans une branche particulière de l'électricité, s'il veut réussir. Dans cet état de choses, il est évidemment impossible à l'ingénieur électricien qui veut s'occuper de tous les genres d'applications de consacrer plus d'une faible fraction de son temps, disons le quart, aux questions mécaniques, au lieu des neuf dixièmes de tout à l'heure. Non que la mécanique ne soit du plus haut intérêt et de la plus grande importance; mais le temps et les facultés d'un homme sont limités, et l'*électricité* est un sujet gigantesque dont un cerveau humain ne peut embrasser qu'une faible partie.

Pour qu'on ne se méprenne pas sur ma pensée, je répète que la mécanique est et restera probablement toujours une partie essentielle des connaissances de l'ingénieur électricien, exactement comme la chimie est indispensable pour comprendre l'électro-métallurgie, les piles primaires et secondaires, etc. ; mais elle n'est qu'une connaissance préparatoire.

L'ingénieur électricien doit être un *ingénieur* dans le plus vaste et le meilleur sens du mot ; sa profession est analogue — mais non identique — à celles de l'ingénieur civil, de l'ingénieur mécanicien, de l'ingénieur des mines.

Pour conclure, j'appelle l'attention sur ce fait que l'inexpérience mécanique dont témoignaient les premiers développements de la dynamo et du moteur électrique est à présent passée et qu'aujourd'hui les bonnes manufactures en livrent qui ne sont en rien inférieures à n'importe quelle autre marchandise d'espèce mécanique. Bien plus, la machinerie électrique est d'une simplicité mécanique remarquable. Comparez le nombre des pièces d'un moteur de 50 chevaux avec celles d'une machine à vapeur de même force ; il n'y a dans le premier qu'à peine le cinquième des godets graisseurs, des paliers, des pivots, des surfaces frottantes, etc., qu'on trouve dans la seconde.

D'autre part, ce qu'il faut aujourd'hui à la dynamo et au moteur électrique, c'est le perfectionnement de l'armature, du commutateur et des balais ; c'est la suppression des étincelles et des courts circuits par brûlures ; c'est-à-dire toutes choses exclusivement d'*ordre électrique* et qui comportent des questions *électriques* très difficile. Sans doute, une bonne construction mécanique de ces parties de la machine est indispensable ; mais elle ne forme qu'un incident dans l'application de principes électriques corrects.

Pour les projets de voitures ou de moteurs de tramways électriques, qui relèvent plus particulièrement de la mécanique (bien que les difficultés *électriques* de cette branche du métier ne soient pas moindres que les difficultés *mécaniques*), je pense qu'il faut employer un ingénieur mécanicien spécialiste, exactement de même qu'on s'adresse à un architecte pour bâtir une maison et à un plombier pour poser des tuyaux d'eau.

(L'Électricien).

SÉANCE DU 31 MAI 1891.

Présidence de M. de Weydlich, président.

Ont signé la liste de présence MM. Broad, Chaudoir, Close, Colard, Cruciani, Dawson, De Bast, Even, Grot-tendieck, Keiffenheim, L'Hoest, Libert, Roosen, de Weydlich.

M. Henrard, empêché d'assister à la séance, prie l'assemblée de l'excuser. M. le Président propose, en conséquence, de remettre à une prochaine séance la discussion de la communication de M. Henrard. Le travail de M. Bayet n'ayant pu être inséré en totalité dans le dernier bulletin, la discussion en devrait être également ajournée. Adopté.

M. Colard donne communication de la note ci-après que M. Pescetto, vice-Président, a envoyée à l'assemblée.

Notes sur l'établissement des paratonnerres.

La protection complète et certaine
d'un édifice contre les dangers
de la foudre, n'est pas si facile
que le croyaient les anciens
électriciens.

O. LODGE.

Jusqu'à ces dernières années un ingénieur n'était pas embarrassé dans l'étude d'un établissement de paratonnerres. On avait des instructions officielles, qui donnaient les plus petits détails, et heureusement, entre toutes ces instructions existait un accord admirable, dû à leur commune origine de celles publiées par l'Académie des Sciences de Paris.

Cependant, de temps en temps quelque coup de foudre avait eu le tort de frapper des édifices pourvus de para-

tonnerres établis suivant toutes les règles. Dans ces cas, on faisait tant de recherches, tant de suppositions et de déductions, qu'on arrivait toujours à la conclusion que certainement, dans l'établissement des paratonnerres, on avait omis quelque précaution ; en général, la faute était à une *mauvaise terre* ; les instructions ne pouvaient pas être fautives.

Mais, peu à peu, quelques voix s'élevèrent contre la science officielle. En 1863, Melsens (1) était conduit par ses études à admettre que, pour l'Hôtel-de-Ville de Bruxelles, le système de paratonnerres le plus sûr, tant *préventif* que *préservatif*, consistait à entourer l'édifice d'une espèce de cage métallique, dissimulée, en grande partie, dans les anfractuosités des maçonneries. Cette cage devait être munie d'un très grand nombre de pointes courtes, hérissant ainsi l'édifice d'une nombreuse série d'aigrettes ; les extrémités inférieures des conducteurs devaient se raccorder métalliquement : 1^o avec un puits ; 2^o avec les conduites d'eau ; 3^o avec les conduites de gaz.

Le système de Melsens est bien différent de celui patronné par les instructions et basé sur l'emploi d'un petit nombre de conducteurs à large section et de tiges de grande hauteur.

Melsens resta longtemps seul à défendre un système qui, seulement en 1881, au Congrès international des Electriciens de Paris, obtint l'approbation de plusieurs électriciens distingués.

Mais, dans le système de Melsens, on donnait encore une importance capitale à une *bonne terre*, d'accord sur ce point avec les instructions généralement acceptées. En 1876, Maxwell admettait, avec Melsens, que dans un édifice complètement revêtu de feuilles métalliques (2),

(1) Bulletin de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique, t. XX, 1863.

(2) Report of the British Association for the Advancement of Science, 1876 — Maxwell ajoute qu'en pratique il suffirait d'entourer les fondations d'un fil métallique et de le réunir à d'autres fils métalliques courant le long des arêtes des gouttières et des faîtes.

on n'aurait pas aperçu le moindre phénomène électrique, quelle que fut la violence des décharges électriques à l'extérieur. Et il ajoutait qu'une réunion à *la terre* n'était pas nécessaire; on pourrait même isoler du sol les lames métalliques revêtant les fondations par l'interposition d'une couche d'asphalte, sans avoir à craindre à l'intérieur l'action de la foudre.

La zone de protection aussi était progressivement réduite et, en 1887, il niait l'existence d'une zone de protection absolue autour d'une tige, en écrivant dans l'*Electricité* :

« La zone de protection d'un paratonnerre quelconque » est exactement telle que la résistance que l'électricité » rencontre pour se décharger aux limites de cette zone » est égale à celle qu'elle rencontre dans le paratonnerre.

» Ces limites dépendent donc des résistances relatives » du paratonnerre et de la zone qu'on veut protéger. » Jusqu'à présent, on ne sait pas mesurer ces résistances, » mais on sait qu'elles sont reliées aux phénomènes de » self-induction, à la durée de la décharge, à l'intensité » du courant, à la polarisation aux contacts des parties » métalliques avec la terre, à l'humidité de l'air, etc. » Ces causes agissent différemment sur le paratonnerre » et sur la zone, et par conséquent le rapport entre les » deux résistances varie continuellement; et puisque les » variations se présentent d'autant plus rarement qu'elles » sont plus fortes, on comprend comment on a attribué à » la zone de protection une étendue d'autant plus petite » que l'expérience a été plus longue.

» Lorsqu'on donne des limites de la zone, on devrait » ajouter que la zone ainsi délimitée n'a qu'une proba- » bilité plus ou moins grande d'être protégée. Pour le » moment, c'est l'expérience seule qui permettra d'évaluer » cette probabilité. »

L'efficacité des hautes tiges étant mise en doute, la nécessité d'une bonne terre étant niée, et la sécurité

absolue de la zone de protection, quoique très restreinte, n'étant pas reconnue, l'ingénieur se trouvait déjà bien embarrassé pour étudier une installation de paratonnerres. Mais, pour combler la mesure, le prof. Lodge ouvrait un feu formidable contre les instructions admises, (1) en s'appuyant sur de nouvelles expériences qui prouvaient que les décharges de la foudre sont oscillantes, et sir William Thomson démontrait (2) que, pour les décharges oscillantes à alternances très rapides, l'augmentation du diamètre du conducteur, au-delà d'une limite déterminée n'est pas seulement inutile, mais qu'elle est même nuisible. Il est bien naturel que dans un tel état de choses on désire vivement que quelque Académie, ou quelque Commission d'électriciens de grande autorité, rédige de nouvelles instructions en accord avec les nouveaux résultats acquis par la science et par l'expérience. Mais il est aussi évident qu'en ce moment beaucoup des questions relatives aux paratonnerres, sont encore *sub judice*, et qu'il serait prématuré de formuler de nouvelles instructions aujourd'hui, pour les modifier, même substantiellement, demain.

Pour ces raisons je me suis laissé aller à exposer quelques notes très simples qui, en attendant des instructions autorisées, pourront être prises en considération par celui qui, ayant à étudier une installation de paratonnerres, le voudra faire en tenant compte des idées modernes, ou qui du moins pourront appeler son attention sur celles-ci.

Dans ces notes j'ai spécialement examiné quelques cas qui se présentent dans les fortifications.

1° Les hautes tiges sur les parties les plus élevées des

(1) Conférences à la Society of Arts du 10-17 mars 1888, et discussion au meeting de la British Association de 1889.

(2) Meeting de la British Association du 5 septembre 1890.

édifices devraient être abandonnées. M. Lodge dit que la zone de protection qu'elles déterminent est *illusoire et n'existe pas*. ⁽¹⁾

En effet, à cause de la tension très élevée de l'électricité dans une décharge (des millions ou peut-être des centaines de millions de volts), des étincelles peuvent partir du conducteur même du paratonnerre, quoique celui-ci soit formé d'une grosse barre de cuivre, et fasse une bonne terre. On connaît des cas, où l'électricité a quitté un conducteur excellent sous tous les rapports pour s'élancer sur un mur, etc.

En outre les hautes tiges peuvent déterminer des décharges qui ne se seraient pas produites si ces tiges n'avaient pas existé.

2° Je ne crois pas nécessaire de donner une immense importance à une bonne terre, comme on le fait généralement. Il est certainement indispensable que le conducteur soit amené dans la terre à une distance telle des fondations, des conduites d'eau et de gaz, etc., qu'une décharge, se produisant à son extrémité, ne puisse pas les endommager.

Il ne me paraît pas très logique, en général, que l'électricité quitte, à un certain point un bon conducteur, *parcequ'il n'a pas une bonne terre*, pour choisir un conducteur plus mauvais (mur, air, etc.) qui n'a pas une terre meilleure. Quelquefois cela arrive, mais à cause de l'*impédance*, qui se développe dans le bon conducteur indépendamment de la bonne ou mauvaise qualité de la terre.

Je ne dis pas qu'il ne soit pas utile de procurer une bonne terre, même au prix de quelques sacrifices, lorsqu'on peut le faire; je voudrais seulement qu'on abandonnât l'idée qui fait presque toujours rechercher dans une mauvaise terre la raison qui a empêché un paratonnerre d'agir régulièrement.

(1) Conférences à la Society of Arts 1888.

3° Je pense que la poudre est en sécurité parfaite dans les obus, même lorsqu'ils sont frappés par la foudre; qu'ils soient en bonne communication avec la terre ou qu'ils soient isolés. Par conséquent les magasins pour les obus chargés n'auront pas besoin de paratonnerres.

Si la poudre est dans des caisses métalliques, et si celles-ci sont frappées par la foudre, il y a danger de déflagration par suite de trois causes capables de produire une élévation de température dans quelque point de la caisse :

a) la section métallique peut être trop faible pour la quantité d'électricité qui doit la traverser ;

b) le contact entre le couvercle et la caisse peut ne pas être parfait (à cause de l'interposition de vernis, d'oxyde, etc.) ;

c) le passage de l'électricité d'une caisse à l'autre peut s'effectuer par de mauvais contacts.

Par conséquent les magasins pour la conservation des poudres en caisses métalliques devront être pourvus de paratonnerres.

4° Pour protéger d'une manière absolue une construction quelconque contre les dangers de la foudre, on devrait adopter le système proposé par Maxwell, et qui consiste à l'envelopper complètement de laines métalliques.

M. Lodge, dans une séance de la *Institution of electrical Engineers de Londres* en 1889, proposait, outre la cage à parois continues, pourvue de communications avec la terre, une autre cage extérieure, constituée par un petit nombre (10-12) de conducteurs verticaux, armés de petites pointes, eux aussi en communication avec la terre, et il ajoutait qu'à l'intérieur on ne devrait pas avoir de masses métalliques tout près des parois.

On voit donc qu'il est bien difficile d'obtenir une protection absolue. Dans la plupart des cas, il faut se contenter d'une protection relative. Le meilleur moyen pour l'obtenir

très élevée, *confirmé par la pratique*, c'est le système Melsens ⁽¹⁾. A mon avis, il serait utile de l'exagérer pour s'approcher davantage de l'idéal d'une cage métallique, en diminuant la longueur des pointes et en multipliant le nombre des conducteurs, dont on pourrait réduire la section avec avantage. Pour les conducteurs placés sur les toits on pourra très bien se servir des cordes métalliques hérissées de petites pointes, qui sont employées pour les clôtures des parterres dans les jardins publics.

5° Pour les magasins à poudre il faudra augmenter le nombre des conducteurs, réunir entr'eux les conducteurs verticaux par d'autres enveloppant l'édifice horizontalement. Tous les conducteurs verticaux pénétreront dans la terre jusqu'à une distance telle que l'édifice n'ait pas à craindre les effets d'un coup de foudre éclatant à leurs extrémités. Si on peut constituer une bonne terre, ce sera d'autant mieux.

Il y aurait avantage à avoir un toit métallique, parce qu'il augmenterait la capacité électrique du système et la décharge serait moins disruptive.

Doit-on établir des paratonnerres sur les magasins à poudre recouverts de terre ?

Suivant l'instruction adoptée en Autriche (1877), pour l'établissement des paratonnerres sur les édifices militaires, on doit pourvoir de paratonnerres les magasins à poudre lorsqu'ils ne sont pas enterrés, mais aussitôt qu'on les recouvre de terre on doit supprimer les paratonnerres.

(1) M. Lodge en parlant du système Melsens à la *Institution of electrical Engineers* a dit : « La grande expérience des électriciens belges, qui, plus que tous les autres du monde entier, ont étudié la question des paratonnerres, les a menés à recommander dans ces dernières années les mêmes systèmes de protection que je préconise. Les conclusions auxquelles ils sont arrivés dérivent presque entièrement de l'expérience et sont confirmées par les théories modernes. »

Le 25 juillet 1888, lors d'un violent orage, une étincelle a jailli entre un ancrage et un conducteur du paratonnerre de l'Hôtel-de-Ville de Bruxelles, qui est le type du système Melsens, mais cet accident doit être attribué à certaines déficiences d'installation et non au système.

Je crois cependant qu'il serait prudent de protéger aussi ces magasins à poudre, à moins que la couche de terre n'ait une épaisseur de plusieurs mètres, ou que les maçonneries ne soient couvertes de lames métalliques destinées à les garantir contre l'humidité.

6° Pour la construction des conducteurs on devrait préférer le fer au cuivre, parce que le premier, avec les mêmes dimensions, a des qualités électriques, probablement meilleures pour le but qu'on se propose; il a un point de fusion plus élevé; il est meilleur marché; il tente moins les voleurs, etc.

Dans l'établissement des conducteurs on évite les angles trop aigus et les raccordements à rayon trop petit. Il est préférable que les conducteurs ne soient pas adhérents au bâtiment et qu'ils soient bien visibles. Autant que possible les conducteurs devront être éloignés des conduites d'eau et de gaz et, en général, des masses métalliques. Celles-ci devront être réunies entr'elles par des circuits fermés en communication avec la terre par des conducteurs indépendants de ceux du paratonnerre.

On devra réunir les gouttières au système des conducteurs des paratonnerres; cependant la réunion ne devra pas être limitée à un seul point, mais elle devra se faire en plusieurs points. Les gouttières aussi devront former un circuit fermé.

Les opinions sont partagées relativement à la question de savoir si, dans un bâtiment pourvu de conduites de gaz et d'eau, celles-ci doivent être réunies au système des conducteurs du paratonnerre. Je crois qu'on pourrait réunir à ce dernier les conduites pour l'eau (non celles pour le gaz) dans les parties hors terre, si elles sont près des conducteurs du paratonnerre; sous terre on les réunira à ces conducteurs lorsqu'il ne sera pas possible de les en tenir suffisamment éloignées pour ne pas avoir à craindre que l'électricité, dans une décharge disruptive, ne passe des conducteurs aux conduites.

M. de Weydlich, *président*. — Nous devons des remerciements à M. Pescetto pour la communication pleine d'intérêt qu'il nous fait et à M. Colard pour le soin qu'il a mis à nous l'exposer.

M. L'Hœst remarque que M. Pescetto ne partage pas l'opinion trop absolue de certains électriciens qui considèrent comme un dogme de relier au circuit du paratonnerre toutes les masses métalliques de l'édifice à préserver.

M. Roosen. — Aujourd'hui, dans les gares couvertes de chemin de fer, les masses métalliques des marquises sont reliées à la terre par un circuit indépendant de celui du paratonnerre.

M. Piérard étant dans l'impossibilité d'assister à la séance, M. Roosen communique en son nom une notice sur le réseau téléphonique de Madrid.

L'auteur rappelle que ce réseau, créé en 1883 par le Gouvernement espagnol pour être exploité par lui, fut cédé en 1886 à la *Société des Téléphones de Madrid* qui, en moins de six années, parvint à doubler le nombre de ses abonnés. Actuellement ce nombre est de 1817.

Les lignes présentent cette particularité d'être composées en majeure partie de câbles aériens; les circuits sont doubles. L'emploi des câbles, imposé par un décret municipal, a conduit à créer trois petits bureaux centraux auxiliaires.

M. Roosen met sous les yeux de l'assemblée deux photographies dont l'une représente la salle des commutations et l'autre la tourelle de dispersion du bureau central.

Le personnel féminin du bureau central se compose de 27 employés donnant 7000 communications par jour.

Indépendamment de deux bureaux publics installés à la Bourse et au Continental Express, on trouve, dans ce dernier établissement, douze postes d'auditions théâtrales en plein rapport. Ces postes sont reliés au théâtre Principe Alphonso; la redevance est d'un franc par acte.

Le succès de ces postes d'auditions est tel que la Société se propose d'étendre ce service.

M. de Weydlich, *président*, remercie MM. Roosen et Piérard des renseignements qui viennent d'être communiqués.

Passant à la discussion du travail de M. Cruciani, il renouvelle son observation sur l'acuité de l'angle qui sert à la détermination des ampères-tours. Peut-être obtiendrait-on un degré maximum d'exactitude pour un certain rapport des échelles des ordonnées et des abscisses.

M. Cruciani. — Je crois qu'il est inutile de chercher une exactitude mathématique dans un procédé graphique basé sur le tracé d'une courbe donnée par l'expérience. J'ajouterai que, quelle que soit l'incertitude dans la détermination du point de rencontre de la droite et de la courbe, la méthode proposée, parcequ'elle tient compte de la résistance des spires en série, constitue un perfectionnement par rapport à la méthode ordinaire qui la néglige.

Je ferai remarquer, en outre, que cet angle sert à déterminer les spires en série supplémentaires, c'est-à-dire celles qui doivent compenser les pertes de tension dans les électros en série. Les spires théoriquement nécessaires sont déterminées par la ligne horizontale correspondant à la tension fixée. Or, les premières spires ne sont qu'une faible fraction des secondes et leur détermination graphique ne donnera jamais lieu à une erreur comparable à celle qu'on commet en les négligeant tout à fait.

M. De Bast. — Je pense aussi que, nonobstant ses chances d'erreurs, la méthode proposée donne plus d'exactitude que la méthode d'Hopkinson qui consiste à appliquer la formule du circuit magnétique.

M. de Weydlich, *président*. — Le Comité propose à l'assemblée l'admission à titre de membre associé de M. Bartolomeo Cabella, directeur-gérant de la Tecnomasio, à Milan.

Cette candidature est adoptée à l'unanimité.

La séance est levée à midi et demi.

**Addition au procès-verbal de la séance du 22
Mars 1891.**

L'abondance des matières nous a contraints de différer, dans le bulletin n° 5-6, la publication de la seconde partie du travail de M. Bayet, sur la comparaison entre l'air comprimé et l'électricité comme agents de transport de force à distance.

Nous publions ici la fin de cette note.

Distribution par l'électricité. — Nous devons comparer les deux agents de transport dans des conditions identiques ; ce que je fais avec l'un, je dois pouvoir le faire avec l'autre. Ainsi par l'air comprimé, nous distribuons d'abord la force d'une seule usine dans un rayon de 5000 mètres ; le système de distribution électrique à employer devant produire le même résultat, le seul qui nous le permette et que nous considérerons, c'est le système par courants alternatifs. De plus, il ne peut être question de parler d'éclairage électrique, puisque nous admettons que l'usine marche en pleine charge toute la journée et qu'elle a même, à de certains moments une surcharge ; dans ces conditions, l'éclairage électrique devrait commencer en hiver quand la force motrice donne en plein, ce qui est impossible.

J'ai déterminé (voir page 103 du Bulletin) le prix d'établissement d'une station centrale d'électricité distribuant une force de 5000 chevaux indiqués dans un rayon de 5000 mètres ; de plus nous avons admis, comme pour l'air comprimé, que quelle que soit la manière dont je disposerai les feeders et câbles de distribution, le prix total de la canalisation sera égal à celui que nous aurions si la canalisation consistait en 30 kilomètres de câbles capables de distribuer la moitié de la force de l'usine. En nous servant des chiffres que j'ai donnés, nous pourrions calculer le prix de vente du kilowatt et de là le prix du cheval utile pour l'abonné, le moteur électrique ayant un rendement de 90 %.

Prix de la tonne de charbon en francs	Prix de revient du kilowatt	Prix de coût du kilowatt	Prix du cheval utile
0	6 03 cent.	11.13 cent.	9.10 cent.
4	7.34 "	12.44 "	10.20 "
8	8 64 "	13.74 "	11.25 "
12	9 94 "	15.04 "	12.30 "
16	11.25 "	16.35 "	13.35 "
20	12 41 "	17.51 "	14.32 "
24	13.72 "	18.82 "	15.40 "
28	15 "	20.10 "	16.45 "

Utilisation des forces naturelles. — Le grand avantage que nous procure l'électricité comme agent de transport c'est de n'exiger qu'une canalisation peu coûteuse, la ligne aérienne. Mais, le système n'est pas cependant sans inconvénient. Quand on l'applique en réduction, comme on l'a fait jusqu'à présent, quelques fils télégraphiques suffisent pour transporter une force de quelques dizaines de chevaux; mais quand il s'agit de l'utilisation des chutes d'eau, il n'est plus question de quelques dizaines de chevaux à transporter, mais bien de plusieurs milliers.

Proposons-nous donc de transporter 5000 chevaux; le voltage autorisé étant de 3000 volts et, par conséquent, le courant de 994 ampères; si la densité du courant est de un ampère par millimètre carré, ce qu'elle doit être pour transporter la force d'une manière économique, il nous faudrait une section de cuivre de près de 2000 m^2 , soit 100 câbles de 20 millimètres carrés de section.

Remarquons que la force à transporter sera en règle générale beaucoup plus considérable; supposons la de 20,000 chevaux: il nous faudrait alors 400 câbles de 20 millimètres carrés; que devient la pose sur poteaux dans ces conditions? Dans un projet évidemment tout est possible, et avec des chevalets assez grands on pourrait même le réaliser; mais aura-t-on les autorisations nécessaires pour établir une semblable canalisation aérienne. On raisonne souvent sans tenir compte de ces circons-

tances, et l'électricien est habitué à ne voir de difficultés pratiques nulle part; que dans un pays où la population est peu dense, on obtienne les autorisations nécessaires pour mettre autant de poteaux qu'on le désire, nous l'admettons; mais dans un centre populeux, il nous sera certainement interdit de poser une pareille canalisation aérienne.

Il faut qu'on puisse faire les réparations nécessaires à la canalisation, sans qu'il puisse en résulter de danger pour les ouvriers; il faut donc que les câbles soient disposés sur deux rangées de poteaux, afin qu'on puisse arrêter la nuit le courant sur une des rangées et y faire les réparations nécessaires.

Nous l'avons vu, rien que la quantité de cuivre à mettre sur poteaux, est un obstacle au transport de la force et, si nous nous en tenions à des voltages de 2000 à 3000 volts, on verrait qu'il est impossible de faire des transports à longue distance. Mais les courants alternatifs nous permettent sans danger d'atteindre des tensions plus élevées. Le transformateur à courants alternatifs, peut abaisser le voltage, mais il peut aussi l'élever; le transformateur à courant continu, au contraire, ne peut aller au-dessus d'un certain voltage, par suite des difficultés de construction.

Nous emploierons donc à l'usine centrale des alternateurs marchant à 2000 ou 3000 volts qui seront portés au moyen de transformateurs à 10000, 20000 ou 30000 volts à la sortie de l'usine; la canalisation aérienne transportera l'énergie jusqu'à une certaine distance de la ville ou jusqu'à la ville même suivant les conditions locales. Là, le voltage sera abaissé à 2000 ou 3000 volts, puis distribué en ville par une canalisation entièrement souterraine, car pour se mettre dans les vraies conditions de la pratique, on ne peut admettre qu'en ville on fasse une distribution par fils aériens.

En Amérique, à la vérité, cela s'est réalisé, mais nous voyons ces canalisations disparaître petit à petit. En

Europe nous ne pouvons admettre qu'une grande ville autorise les fils aériens soit pour l'éclairage, soit pour le transport de la force. Toute la canalisation électrique dans l'intérieur d'une ville, qu'elle serve au transport de la force ou à l'éclairage électrique, sera donc souterraine.

Etudions maintenant un transport de force à 10,000 volts. Les frais de pose, les poteaux, les isolateurs, les redevances à payer, etc., pour la canalisation aérienne seront estimés en bloc à raison de 10 francs par mètre courant, le cuivre coté à 2 francs le kilog, la résistance spécifique de celui-ci étant $r = 1,75$ et la densité de courant admise, un ampère par millimètre carré.

Le rendement de transport sera encore déterminé, comme nous l'avons fait pour l'air comprimé, en tenant compte de la perte en ville et de la perte due à la canalisation aérienne. En ville, pour une usine marchant à vapeur, nous avons vu que le rendement de transport était de 63,8 %, le rendement admis étant le rendement journalier et non le rendement maximum.

Les transformateurs destinés à porter le voltage de 2000 à 10000, et de 10000 à 2000 volts, étant sous notre surveillance, marcheront toujours dans les conditions de pleine charge; nous prendrons donc leur rendement égal à 95 %.

Les rendements de transport pour des distances variant de 10 à 100 kilomètres seront :

Distance de l'usine à la ville	Rendement de transport à 10000 volts	Rendement de transport à 20000 volts
10.000	55,5 %	56,5 %
20.000	53,5	55,5
40.000	49,5	53,5
60.000	45,4	51,5
80.000	41,3	49,5
100.000	37,4	47,4

Déterminons au moyen de ces chiffres le prix de vente du kilowatt et du cheval utile, pour des moteurs ayant un

rendement de 90 %. Nous trouverons les chiffres consignés dans le tableau suivant :

Distance de l'usine à la ville en mètres	Prix de la canalisation de l'usine jusqu'à la ville	Capital engagé	Prix de revient du kilowatt	Prix de vente du kilowatt	Nombre de kilowatts produits par mois	Prix du cheval utile
10.000	587.000 fr.	4.038.000 fr.	8.17 cent.	15.04 cent.	735 000	12.30 cent.
20.000	785.000	4.236.000	8.62	16.09	708.000	13.15
40.000	1.182.000	4.633 000	9.65	18.48	656.000	15.10
60.000	1.578.000	5.029.000	10.90	21.30	602.000	17.45
80.000	1.975.000	5.426.000	12.40	24.80	547.000	20.30
100 000	2.372.000	5.823.000	14.20	28 90	496.000	23.70
"	2.412 000	5.863.000	10.15	20.67	695.000	16.95

Le dernier chiffre de ce tableau a été calculé pour une tension de 20,000 volts et une densité de courant d'un demi ampère par millimètre carré..

Comparaison entre l'électricité et l'air comprimé. — Prenons d'abord le cas qui se présentera le plus souvent, celui d'une usine à vapeur établie dans une ville; nous avons trouvé les chiffres suivants pour prix de revient du cheval utile rendu à l'abonné.

Prix de la tonne de charbon en francs	PRIX DU CHEVAL UTILE		
	AIR COMPRIMÉ		ÉLECTRICITÉ
	Air froid	Air chaud	
0	12.30 cent.	7.92 cent.	9.1 cent.
4	13.80	8.88	10.20
8	15.25	9.80	11.25
12	16.75	10 80	12.30
16	18.20	11.70	13.35
20	19.70	12.65	14.32
24	21.20	13.65	15.40
28	22.70	14.60	16.45

Nous avons établi la comparaison pour des moteurs d'une certaine puissance de 30 à 50 chevaux, dont le rendement serait de 90 %, dans les deux cas, air et

électricité, et nous avons de plus admis, pour l'air chaud, des chiffres se rapportant à une marche de 150°.

Ces chiffres ont été calculés en admettant que la détente soit poussée jusqu'à la valeur de la contrepression. En pratique la détente ne sera peut être pas poussée aussi loin, mais d'un autre côté la température pourra être facilement portée à 170°, et de plus, en rendant l'air humide avant son entrée dans le réchauffeur, nous obtiendrons certainement une diminution dans la dépense par cheval, qui compensera la perte que nous aurons faite en ne prolongeant pas la détente aussi loin que nous le pensons ; les chiffres de consommation d'air par cheval que nous avons indiqués seront donc facilement atteints, et ils sont du reste bien supérieurs à ceux que MM. Riedler et Proëll indiquent comme pouvant être atteints en pratique.

Nous avons donc fait la comparaison des deux systèmes de transport dans des conditions identiques, et nous en sommes arrivés à trouver à peu près l'équivalence entre les deux systèmes ; l'air comprimé l'emportant cependant sur l'électricité. Mais on peut se demander si cette simple comparaison suffit, et s'il ne se pourrait pas qu'une différence plus marquée existât entre les prix du cheval, provenant de quantités que nous avons négligées et qui sont les frais d'intérêt et d'amortissement du capital engagé, frais d'entretien, de nettoyage, de graissage, etc. Nous devrions évidemment tenir compte de toutes ces quantités pour établir d'une manière rigoureuse le prix du cheval utile pour l'abonné. Cette question a été traitée par M. Korte de Barmen. (Voir *Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure*, n° du 10 janvier 1891). Il a comparé les moteurs à vapeur, à gaz, à eau, à air et électriques, et si nous admettons pour tous une marche de 10 heures par jour et de 300 jours par an, nous tirons de son travail cette conclusion, que la valeur de toutes les quantités dont j'ai parlé plus haut, intérêt, amortissement, graissage, etc. est à peu près la même pour les moteurs à vapeur, à

air, et électriques. Tous ces frais sont estimés pour de petits moteurs de 3 à 6 chevaux à 4 ou 5 centimes par cheval heure ; cette quantité diminuant au fur et à mesure que la puissance du moteur s'accroît. Dans les frais du moteur à air est compris le coke nécessaire au réchauffage de l'air ; c'est pourquoi je n'en ai pas tenu compte dans l'établissement des prix que j'ai donnés pour le moteur à air chaud.

J'ai parlé de moteurs de 30 à 50 chevaux, mais le vrai type de moteurs que nous rencontrerons le plus souvent dans une distribution de force, sera compris entre 5 et 10 chevaux. Prenons un moteur de 10 chevaux : dans le cas de l'air comprimé nous aurons par cheval utile une dépense de 16m^3 ; quant au moteur électrique son rendement est de 80 %.

On aurait donc dans ce cas, qui est le plus général, les prix suivants :

Prix de la tonne de charbon en francs	PRIX DU CHEVAL UTILE		Différence
	Air comprimé	Électricité	
0	8.56 cent.	10.25 cent.	1.69 cent.
4	9.57	11.45	1.88
8	10.60	12.65	2.05
12	11.65	13.82	2.17
16	12.65	15.05	2.40
20	13.70	16.12	2.42
24	14.72	17.32	2.60
28	15.75	18.50	2.75

Le désavantage pour l'électricité est donc réel, et cependant j'ai admis la tension plus favorable de 3000 volts, au lieu des 2000 volts ordinairement employés.

Je me suis placé, pour établir les prix d'installation des usines, sur ce que nous aurions en Belgique, et j'ai admis pour l'électricité comme pour l'air comprimé, des prix d'installation qui peuvent être diminués dans la même proportion ; d'autre part, je me suis mis dans des conditions identiques, également favorables pour un système et pour l'autre. Je tiens donc comme valable la comparaison établie entre les prix.

Il reste à examiner un point que nous n'avons pas touché dans le calcul du prix de revient, c'est celui des pertes de la canalisation.

Pour l'air comprimé je l'ai dit, les fuites d'air ne sont pas aussi importantes qu'on le croit; du reste les fuites d'air ne représentent que du charbon, et de plus nous n'avons compté que sur un compresseur donnant 10 mètres cubes d'air par cheval, alors que nous pouvons espérer avoir plus. La canalisation n'aura que peu de fuites d'air, les vraies fuites se tiennent dans les installations particulières, de même qu'en électricité le mauvais isolement d'une canalisation ne provient pas tant de la canalisation elle-même que des installations particulières qui sont branchées sur elle. Une partie nous en étant ainsi payée, nous ne risquons pas d'éprouver de mécompte sérieux par suite des fuites d'air. Malgré cela nous ne pouvons admettre le prix du mètre cube d'air tel que je l'ai donné pour réaliser le bénéfice indiqué, car il suppose des compteurs d'une exactitude absolue et, aussi bien pour l'électricité que pour l'air comprimé, un bon compteur est encore à trouver. Je crois que pour tenir compte de cette circonstance, il sera bon de majorer de 20 % le prix que j'ai indiqué. Dans un précédent travail, je disais en parlant des avantages pratiques réels que le moteur à air possède sur le moteur électrique: « Malgré tous ces avantages, je me propose de montrer dans ce qui suit que l'électricité l'emporte sur l'air au point de vue du prix de revient, et que, si nous nous plaçons dans les conditions pratiques de la question, à savoir que toutes les villes d'une certaine importance doivent avoir une distribution de force motrice, je démontrerai que l'électricité seule donne une solution convenable. » Il semblerait donc que j'ai changé d'opinion. Nous venons de montrer que le transport par l'air l'emporte sur le transport par l'électricité, au point de vue du prix, et nous pouvons même ajouter qu'à égalité de prix, ce serait encore l'air qu'il faudrait employer, étant donnés la

facilité avec laquelle il permet de résoudre tous les problèmes qui peuvent se présenter, et le grand avantage qu'il présente sur tous les autres systèmes de distribution de permettre l'emploi des moteurs déjà existants.

Mais ici il faut bien s'entendre et ne pas exagérer la portée de notre conclusion ; nous disons, avec tout le monde, qu'il est désirable que chaque ville d'une certaine importance soit pourvue d'une distribution de force motrice ; toutefois, il faut dans chaque cas se demander si la chose est possible.

Dans une grande ville, on ne rencontrera pas de difficulté à créer un centre de force important, qui desservira une partie des moteurs seulement, car nous ne pouvons mettre des conduites dans toutes les rues. En général les moteurs se trouveront disséminés dans les faubourgs, sur le périmètre de la ville et non dans le centre ; notre usine étant évidemment placée également dans les faubourgs, les conduites seront fort longues.

Nous avons admis 30 kilomètres pour une usine de 5000 chevaux ; dans nombre de cas, ce sera trop peu, même en excluant, pour la faire payer au client, une partie de la canalisation secondaire, comme cela se pratique parfois. Pour alimenter tous les moteurs se trouvant dans une ville, on peut dire qu'à part le centre, il faudrait presque avoir une conduite dans chaque rue. En règle générale on se contentera d'alimenter une partie seulement des moteurs, favorablement distribuée en un certain nombre de rues, c'est-à-dire principalement dans les quartiers ouvriers et excentriques ; souvent, et ce sera là une circonstance favorable, une grande partie de ces moteurs seront groupés à proximité de l'usine. Nous réduirons donc, la distribution de force à une certaine partie de la ville, et là où c'est praticable, nous emploierons l'air comprimé dont la clientèle sera rapidement assurée, puisque nous alimenterons les moteurs déjà existants.

Les premières années de l'exploitation ne seront donc pas aussi dures à passer que dans le cas d'une installation électrique, où il faut premièrement décider les abonnés à vendre leurs moteurs à vapeurs et à prendre des moteurs électriques qui ne coûtent pas peu.

Il faudra donc dans chaque étude d'une distribution de la force par l'air, voir d'après les moteurs existants, s'il est possible de réunir une clientèle suffisante. J'ai cité (page 115) les ports de mer où une distribution de force est toute indiquée, et là comme dans chaque cas où c'est la force qu'on veut transporter, l'air comprimé doit être choisi.

Un facteur important à considérer pour décider de l'essai d'une distribution de force, c'est le prix du cheval vapeur. On parle beaucoup des ennuis occasionnés par les chaudières ; ils existent certainement surtout pour les petites forces, car une petite chaudière est bien plus dangereuse, plus difficile à conduire, et demande plus de soins qu'une grande ; mais la chaudière existera quand vous créerez une distribution de force et il faut qu'il y ait un bénéfice réel pour l'exploitant à employer l'air comprimé pour qu'il se décide à renoncer à la marche à vapeur. Ce qu'il veut avant tout, c'est gagner de l'argent, et si, (même étant donnés les ennuis qu'occasionnent les chaudières et qu'il ne faut pas non plus exagérer à plaisir), il trouve un prix du cheval moindre en employant la vapeur, il le fera certainement.

Pour des petits moteurs, la marche à vapeur est peut être un peu plus avantageuse, mais les ennuis et les dangers permanents d'explosion et d'incendie décideront sans doute l'exploitant à prendre la marche à air. Pour de grands moteurs il n'en sera plus ainsi. Admettons, dans ce qui va suivre, que les chiffres de M. Riedler se vérifient en pratique, et qu'on arrive pour la marche à air chaud à ne plus dépenser que 9 mètres cubes par cheval indiqué en injectant un peu d'eau dans l'air. Nous laisserons naturellement de côté les chiffres de 6 et 7 mètres cubes calculés

dans l'hypothèse qu'on injecte 2 litres d'eau dans l'air, car ils demandent confirmation; remarquons au surplus que si les quantités d'eau calculées sont trop faibles, nous serons amenés à avoir une chaudière, et à compter sur une consommation de 300 à 400 grammes de coke par cheval heure.

Supposons donc qu'à air chaud on arrive à ne plus dépenser que 9 m^3 d'air, les moteurs existants étant en général à marche lente, nous ne pouvons compter que sur un rendement mécanique de 85 %, soit une dépense de $\frac{9}{0,85} 10,6 \text{ m}^3$ d'air par cheval utile.

Soit, par exemple, un prix de 12 francs pour la tonne de houille, prix moyen en Belgique, et admettons qu'une machine à vapeur consomme 4 kilogs de houille par cheval, allumage compris, le prix du cheval-heure sera donc de 4,8 centimes. Nous avons trouvé pour prix de vente du mètre cube d'air, dans un pays où la houille vaut 12 francs, 0,728 centime, mais nous avons ajouté qu'étant données les imperfections à prévoir pour les compteurs, il fallait prendre comme véritable prix de vente $1,2 \times 0,728 = 0,875$ centime. Le cheval utile produit par l'air coûtera donc $0,875 \times 10,6 = 9,28$ centimes, soit 4,48 centimes plus cher que le cheval-vapeur. Il est bien évident que, même en admettant, ce qui est logique, que les petits particuliers paient leur charbon plus cher que nous, et en tenant compte que tous les faux frais qui n'existent pas pour l'air comprimé, à savoir le chauffeur, l'intérêt et l'amortissement de la chaudière, les redevances à payer à la ville pour la marche à vapeur, etc., la marche à vapeur pour des moteurs d'une certaine puissance sera toujours plus économique que la marche à air. Par conséquent nous devons nous borner à alimenter les moteurs de faible puissance.

Nous concluons en disant qu'une distribution de force n'est pas toujours possible à cause de circonstances

locales ; mais si elle est possible c'est l'air comprimé qui doit être employé.

Si l'éclairage électrique existe, l'électricité l'emportera peut-être comme prix, et c'est là, je crois, la vraie solution du problème. J'en ai dit quelques mots dans mon travail sur le transport des courants alternatifs, mais j'y reviendrai plus tard pour donner à ce système combiné d'éclairage et de transport de force, les développements qu'il comporte.

Comparaison entre l'électricité et l'air comprimé, comme agents de transport à longue distance.—Si nous comparons les deux agents en présence au point de vue du transport à grande distance, nous voyons en nous reportant aux tableaux donnés aux pages 322 et 323, qu'en admettant 20,000 volts, nous arrivons avec beaucoup de difficultés au même prix du cheval-utile que nous pouvons obtenir par l'air. Si nous prenons 10,000 volts, l'électricité donne des prix plus élevés que l'air comprimé. A 100,000 mètres avec 20,000 volts, et une densité d'un demi ampère par millimètre carré, nous sommes arrivés au prix du cheval de 16,95 centimes, tandis qu'avec l'air en employant une seule conduite nous arrivons à 16 centimes et avec deux conduites à 17,50 centimes.

Nous pourrions augmenter encore sans difficulté la pression pour l'air et nous arriverions à un prix du cheval-utile inférieur à ce que peut donner le transport par l'électricité.

L'air comprimé convient donc parfaitement pour le transport à longue distance et il donnera toujours de meilleurs résultats que l'électricité. Dans tous les cas, je serai autorisé à mettre des conduites dans le sol, tandis que j'éprouverai souvent des résistances explicables à l'établissement de deux lignes aériennes à 20,000 volts, comprenant un grand nombre de chevalets d'une certaine dimension, car pour le transport de la force, il ne s'agit

pas de faibles forces à transporter, mais de plusieurs milliers, parfois même de plusieurs dizaines de milliers de chevaux. Nous avons établi la comparaison pour 5,000 chevaux, mais pour 20,000 ou 40,000 chevaux, le transport par l'air comprimé serait bien plus économique que pour 5,000, tandis que le transport par l'électricité devient de plus en plus onéreux.

Si la chute d'eau se trouve dans une contrée assez déserte, nous aurons certainement l'autorisation d'y installer la canalisation aérienne, mais arrivés à 5,000 ou à 10,000 mètres de la ville, nous rencontrerons des villages, des routes fréquentées, etc., et nous serons obligés d'avoir une canalisation souterraine jusqu'à la ville; d'où nécessité d'un quatrième transformateur, car il faudra passer des 20,000 volts à la tension de 10,000 ou 5,000 volts pour pouvoir utiliser la canalisation souterraine.

Les considérations que nous venons d'exposer nous permettent de voir dans quelles limites il peut y avoir intérêt à transporter l'énergie à distance. En fait cet intérêt dépend principalement de la distance de la chute d'eau à la ville et du prix de la tonne de charbon.

Ainsi si on transporte à 20,000 mètres dans un pays où la houille vaut 4 francs la tonne, le prix du cheval est le même que celui qu'on obtiendrait si on installait dans la ville même une usine marchant à vapeur. Pour 40, 60, 80, 100 kilomètres, l'équivalence a lieu si la houille vaut respectivement 12 à 16 francs, 24 francs et 30 francs. Suivant le prix de la houille et la distance à laquelle on doit transmettre la force, le transport peut donc avoir beaucoup ou peu d'importance. Il peut être question ici de remplacer tous les moteurs à vapeur d'une ville quelle que soit leur puissance, parce que suivant les circonstances, nous pourrions fournir le cheval utile à meilleur prix que le cheval-vapeur. S'il en était ainsi l'air comprimé devrait être employé, car il nous permet de nous servir des moteurs déjà existants.

Mais alors il resterait encore à examiner s'il ne serait pas préférable d'utiliser les chutes d'eau pour l'éclairage seul ou pour l'éclairage et le transport de force combinés ; j'étudierai prochainement cette question particulière.

Il est des cas spéciaux où un transport de force à distance peut encore réussir tout en étant alimenté par une usine à vapeur. Tel est le suivant : Bakou est à 12 kilomètres du champs d'exploitation de pétrole où se trouvent réunies dans un espace assez restreint un millier de petites machines d'extraction d'une puissance de 10 à 15 chevaux. Ces machines marchent actuellement à la vapeur, ce qui est un grand ennui, car la prudence exige que les chaudières se trouvent à une centaine de mètres du puits.

Le combustible est le résidu de la distillation du pétrole, lequel coûte 1,25 à 1,3 fois plus cher au champs d'exploitation qu'à Bakou. Le transport par l'air est le seul qui puisse convenir dans ce cas ; la marche étant intermittente, nous aurons des moteurs à air froid, avec les machines existantes. Dans ces conditions, les propriétaires du puits trouveront un avantage pécuniaire considérable sur la marche à vapeur.

Cette application est certainement une des plus heureuses qu'on puisse rencontrer ; la force est concentrée, parfaitement déterminée, les machines d'extraction marchent 24 heures et il n'y aura aucune modification à apporter aux moteurs pour marcher à air ; c'est donc avec raison qu'on réalisera cette installation de 10,000 chevaux et la réussite en est certaine.

SEANCE DU 28 JUIN 1891.

Présidence de M. de Weydlich, président.

Ont signé à la liste de présence MM. Colard, Cruciani, Dawson, De Bast, Demany, Dierman, Discry, Dulait, Grottendieck, Hauman, L'Hoest, Malengret, Orban, Piérard, du Welz, de Weydlich.

Les procès-verbaux des trois dernières séances sont approuvés.

Lecture est donnée de lettres de MM. Chaudoir, Close, Henrard, Roosen et Tasté, qui s'excusent de ne pouvoir se rendre à Liège ce jour.

M. Demany, vice-président, remplace M. de Weydlich au fauteuil.

M. de Weydlich, expose à l'assemblée une

Note sur les mesures de la puissance des courants alternatifs.

Le revirement remarquable qui se produit depuis peu de temps en faveur des applications des courants alternatifs a appelé, d'une manière particulière, l'attention des électriciens sur les méthodes employées pour les mesures de la puissance des courants de cette nature. Ce genre de mesures présente des difficultés spéciales, que l'on ne rencontre pas quand on a affaire à des courants continus, et qui sont dues aux effets d'induction qui engendrent des forces électro-motrices secondaires; on ne peut donc plus, comme dans le cas des courants continus, mesurer simplement l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes du circuit pour calculer, par le produit de ces quantités, la valeur de la puissance électrique qui y est développée.

En effet l'expression de la puissance électrique ne sera plus dans ce cas le produit $E I$ (où E indique la différence de potentiel efficace aux bornes du circuit et I l'intensité efficace du courant qui le parcourt) mais, en général, ce produit devra être multiplié par un facteur fractionnaire, dont la valeur n'est connue que dans le cas particulier où les variations du courant suivent une loi sinusoïdale simple par rapport au temps ; et même dans ce cas, ce facteur étant une fonction de la fréquence du courant ainsi que de la constante de temps du circuit dont les valeurs sont généralement difficiles à connaître avec une exactitude suffisante, on cherche toujours dans les mesures de la puissance électrique à éviter sa détermination directe.

La méthode la plus employée jusqu'à présent pour la mesure de la puissance développée par les courants alternatifs est basée, comme on sait, sur l'emploi d'un électro dynamomètre (qui dans ce cas prend le nom de wattmètre), dont la bobine fixe est intercalée dans le circuit et la bobine mobile est mise en dérivation sur les bornes du circuit. La graduation de cet appareil étant faite au moyen de courants continus, ses indications, lorsqu'il est employé pour des courants alternatifs, ne seront exactes qu'à condition qu'il soit absolument sans self-induction, ce qui évidemment est impossible ; aussi devra-t-on, en général, multiplier les résultats obtenus par un facteur de correction dont l'expression (dans le cas d'une loi sinusoïdale simple) peut se mettre sous la forme :

$$\frac{1 + \omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau'^2},$$

où $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (T étant la durée de la période du courant,

τ la constante de temps du circuit dérivé et

τ' » » » principal.

On voit immédiatement d'après cette expression que, quelle que soit la constante de temps τ' du circuit principal,

la valeur du facteur de correction deviendrait égale à l'unité pourvu que la constante de temps τ du circuit dérivé soit nulle, c'est-à-dire que le coefficient de self-induction de ce circuit soit nul. On sait comment dans le wattmètre de M. Zipernowski on a cherché à réduire autant que possible cette quantité, sans cependant parvenir à l'éliminer complètement, de sorte que les résultats obtenus au moyen de cet appareil peuvent, dans certaines conditions, être entachés d'une erreur dépassant 10 % ; comme l'application du facteur de correction exige la connaissance de quantités difficilement mesurables et eu égard surtout à l'incertitude que l'on a affaire à un courant variant suivant la loi sinusoïdale simple, on conçoit la nécessité d'employer d'autres méthodes de mesure exemptes de cet inconvénient.

Une méthode bien ingénieuse et satisfaisant au desideratum que nous venons d'énoncer, quoique basée également sur l'emploi de l'électro-dynamomètre, fut proposée par M. Blakesley; seulement elle n'est applicable qu'au cas d'un transformateur. Cette méthode consiste à intercaler l'une des bobines de l'électro-dynamomètre dans le circuit primaire du transformateur et l'autre dans le circuit secondaire (split-dynamometer); on intercale en outre, de la manière ordinaire, deux autres électro-dynamomètres respectivement dans le primaire et dans le secondaire. Les déviations α , α_1 et α_2 , donnent :

$$K\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt, K_1 \alpha_1 = \frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt \text{ et } K_2 \alpha_2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_2^2 dt$$

où K , K_1 et K_2 sont les constantes des trois appareils, i_1 et i_2 les intensités des courants primaire et secondaire à un instant quelconque et enfin T la durée de leur période.

Il est aisé de démontrer que les puissances électriques P_1 (fournie au primaire) et P_2 (absorbée dans le circuit extérieur du secondaire) peuvent être calculées d'après les formules :

$$P_1 = K_1 r_1 \alpha_1 + \frac{n_1}{n_2} (r_2 + R) K \alpha \text{ et } P_2 = K_2 \alpha_2 R$$

où r_1 et r_2 indiquent les résistances de l'enroulement primaire et secondaire, n_1 et n_2 le nombre de spires de ces enroulements et enfin R la résistance du circuit d'utilisation.

Cette méthode présente l'avantage d'être absolument indépendante de la loi du courant ainsi que de la self-induction des appareils; cependant, il est à remarquer, qu'elle exige qu'il n'y ait pas de perte de flux magnétique dans le transformateur et qu'elle ne peut donner la puissance fournie au circuit primaire dans le cas où le circuit secondaire serait ouvert.

On doit à M. Potier (*) une excellente méthode basée sur l'emploi de l'électromètre à quadrants et qui consiste à relier chacune des deux paires de quadrants de l'appareil respectivement aux extrémités du circuit dans lequel on se propose de mesurer la puissance électrique, et à mettre successivement l'équipage mobile de l'appareil en connexion avec les extrémités d'une résistance sans self-induction intercalée dans le circuit. La différence des deux lectures α et α' ainsi obtenues donne la valeur de la puissance cherchée; en effet, en désignant par V_1 et V_2 les potentiels des deux paires de quadrants, par V et V' ceux de l'équipage mobile au moment des deux lectures et par r la valeur de la résistance additionnelle, on a :

$$\begin{aligned} \frac{K}{r} (\alpha - \alpha') &= \frac{1}{r} \left[\frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V_2) \left(V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right) dt - \frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V_2) \left(V' - \frac{V_1 + V_2}{2} \right) dt \right] \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V_2) \frac{(V - V')}{r} dt = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt = P, \end{aligned}$$

K étant la constante de l'appareil employé.

(*) En Angleterre cette méthode est attribuée à MM. Ayrton et Fitzgerald; cependant d'après M. Ledebor (voir Lum. Elect. vol. 30, p. 510), la priorité en reviendrait à M. Potier.

Cette méthode, qui est non-seulement indépendante de la loi de variation du courant, mais aussi absolument exempte de toute cause d'erreur provenant des effets d'induction, a été cependant délaissée depuis que l'on a signalé l'incorrection des résultats que l'on obtient avec l'électromètre à quadrants si l'on se base sur la relation exprimée par la formule :

$$K\alpha = (V_1 - V_2) \left(V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

En effet, M. Gouy a démontré depuis qu'il se produit dans cet appareil un couple électrique *directeur* proportionnel à l'angle de déviation α et au carré de la différence de potentiel $(V_1 - V_2)$ des quadrants, de sorte que la formule devrait prendre la forme :

$$\left[K + K' (V_1 - V_2)^2 \right] \alpha = (V_1 - V_2) \left(V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

En outre, tout récemment, le professeur Ayrton dans une communication faite à la Société royale de Londres, constate des causes d'erreur qui proviennent de la dissymétrie qui se produit entre la position de l'équipage mobile et les pièces accessoires de l'appareil lors de la déviation.

Par suite de ces considérations, la méthode de M. Potier a été abandonnée, mais c'est probablement en s'inspirant de cette méthode, que le professeur Ayrton en a combiné une autre dans laquelle au lieu d'un électromètre on n'a besoin que d'un simple voltmètre à courants alternatifs (le voltmètre Cardew par exemple). En dérivant successivement cet appareil sur le circuit principal, puis sur une résistance sans self-induction mise à la suite de ce circuit, enfin sur les deux en série on obtient les valeurs correspondantes des différences de potentiel efficaces V_1 , V_2 et V et la puissance absorbée dans le circuit principal se calcule d'après la relation :

$$P = \frac{I}{2r} (V^2 - V_1^2 - V_2^2) \quad (*)$$

Cette méthode, qui est certainement très-commode et indépendante de la loi du courant, présente cependant un inconvénient notable au point de vue de la sensibilité; comme le professeur Ayrton l'a démontré lui-même, pour obtenir une bonne exactitude par cette méthode, il faut que la différence de potentiel V_2 soit environ égale à V_1 , par suite la résistance additionnelle doit être suffisamment grande pour absorber une puissance au moins égale à celle du circuit principal et la dynamo employée devra fournir un voltage deux fois plus grand que celui qu'elle devrait donner s'il n'y avait pas de résistance additionnelle dans le circuit.

Le professeur Fleming s'est empressé d'obvier au dernier de ces deux inconvénients en proposant une méthode analogue basée sur l'emploi de trois électro-dynamomètres dont l'un est intercalé à la suite du circuit principal, un autre mis, avec une résistance sans self-induction, en dérivation sur ce circuit et enfin un troisième placé avant la bifurcation des deux circuits dérivés. D'après les valeurs des intensités efficaces I_1 , I_2 et I ainsi obtenues, on trouve pour l'expression de la puissance absorbée dans le circuit principal :

$$P = \frac{r}{2} (I^2 - I_1^2 - I_2^2)$$

(*) En effet, en désignant par v , v_1 et v_2 les valeurs instantanées des différences de potentiel, on a d'abord :

$$v = v_1 + v_2, i = \frac{v_2}{r}, v^2 = v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2 \text{ d'où } v_1 v_2 = \frac{1}{2} (v^2 - v_1^2 - v_2^2)$$

D'autre part la puissance s'exprime par :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_1 i dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v_1 v_2}{r} dt = \frac{1}{2r} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T (v^2 - v_1^2 - v_2^2) dt;$$

d'où, en désignant par v , v_1 et v_2 les différences de potentiel efficaces, on obtient la formule ci-dessus.

Cette méthode évite, en effet, la nécessité d'augmenter le voltage normal de la dynamo, mais par contre, on conçoit facilement que dans ce cas les conditions les plus favorables à l'exactitude de la mesure correspondent à l'égalité des courants I_1 et I_2 de sorte qu'au lieu d'un voltage double, la dynamo devrait fournir un courant deux fois plus intense.

En comparant les avantages et les inconvénients des méthodes que nous venons d'examiner, on est conduit, nous semble-t-il, à donner la préférence à l'emploi de l'électromètre pour les mesures de la puissance des courants alternatifs. En effet, avec cet appareil les erreurs qui proviennent des effets de la self-induction ainsi que de l'échauffement que produit le courant sont complètement éliminées; la perte d'énergie due à l'introduction dans le circuit d'un conducteur additionnel sans self-induction peut être rendue d'autant plus insignifiante que la différence de potentiel des quadrants sera plus considérable (c'est ce qui est généralement le cas avec les courants alternatifs) et ne pas dépasser quelques centièmes de l'énergie totale; d'ailleurs cette perte n'a aucune influence sur l'exactitude de la méthode. Quant à la complication due au couple directeur électrique, dont l'existence a été démontrée par M. Gouy, ainsi qu'aux irrégularités signalées par le professeur Ayrton, il y aurait un moyen bien simple de les éviter. En effet, comme tous ces écarts de la formule primitive de l'électromètre à quadrants sont des fonctions de la déviation de l'équipage mobile, il suffirait de maintenir cet équipage dans sa position de repos au moyen d'une torsion imprimée au fil de suspension (comme dans les électro-dynamomètres), pour que la formule:

$$K\alpha = (V_1 - V_2) \left(V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

reste parfaitement rigoureuse.

Pour ne pas perdre, par l'adoption de ce procédé, les avantages que présente, au point de vue de la sensibilité,

la méthode des lectures par réflexion, on pourrait, en outre du miroir que porte l'équipage mobile de l'appareil, fixer un second miroir à la tête de torsion du fil de suspension; pour éviter tout ébranlement de l'appareil, il serait bon d'agir sur le bouton de torsion au moyen d'une vis micrométrique tangente. On aurait donc deux images sur l'échelle; celle qui serait produite par le premier miroir servirait à évaluer exactement la position de repos de l'équipage mobile et l'autre due au second miroir, à déterminer l'angle de torsion du fil de suspension.

Si on se propose de mesurer au moyen du même appareil des angles de torsion bien plus grands que ceux limités par l'échelle, on pourrait fixer à l'appareil un cercle gradué (comme dans les électro-dynamomètres) sur lequel on pourrait évaluer des angles allant jusqu'à 360°. On obtiendrait de cette façon un appareil avec deux degrés de sensibilité très-différents.

Grâce à ces légères modifications, l'usage de l'électromètre nous semble présenter toutes les garanties d'exactitude et de commodité d'emploi désirables, surtout si l'on adopte le modèle d'électromètre préconisé par le professeur Eric Gerard (voir ce Bulletin, 1890, p. 327), qui a rendu cet appareil parfaitement apériodique et d'une construction suffisamment robuste pour être employé aisément même dans les laboratoires industriels.

Pour finir cette plaidoirie en faveur de l'électromètre à quadrants, je proposerai encore une méthode pour la mesure de la puissance fournie à un transformateur, basée sur l'emploi de cet appareil. A cet effet il suffira de mesurer les différences de potentiel efficaces aux bornes des enroulements primaire et secondaire, c'est-à-dire les intégrales :

$$\frac{1}{T} \int_0^T e_1^2 dt \text{ et } \frac{1}{T} \int_0^T e_2^2 dt$$

ainsi que l'intégrale :

$$\frac{1}{T} \int_0^T e_1 e_2 dt$$

Les deux premières intégrales s'obtiennent en employant l'électromètre par la méthode idiostatique due à M. Joubert, tandis que la dernière sera déterminée par la différence des déviations observées lorsqu'on relie successivement l'équipage mobile de l'appareil à chacune des bornes secondaires, les paires de quadrants étant reliées aux bornes primaires du transformateur. On aura de cette façon :

$$K(\alpha - \alpha') = \frac{1}{T} \int_0^T e_1 e_2 dt, \quad 2K\alpha_1 = \frac{1}{T} \int_0^T e_1^2 dt \quad \text{et} \quad 2K\alpha_2 = \frac{1}{T} \int_0^T e_2^2 dt$$

D'autre part, d'après les relations bien connues, on a dans le cas d'un transformateur :

$$e_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{dN}{dt} \quad \text{et} \quad n_2 \frac{dN}{dt} = (r_2 + R) i_2 = (r_2 + R) \frac{e_2}{R},$$

le circuit d'utilisation étant supposé sans self-induction.

En éliminant $\frac{dN}{dt}$ entre ces équations, on a :

$$e_1 = r_1 i_1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{r_2}{R} + 1 \right) e_2$$

et, multipliant tous les termes par $e_1 dt$, intégrant de 0 à T et divisant par T, on trouve :

$$\frac{1}{T} \int_0^T e_1^2 dt = \frac{r_1}{T} \int_0^T e_1 i_1 dt + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{r_2}{R} + 1 \right) \frac{1}{T} \int_0^T e_1 e_2 dt$$

ou en substituant aux intégrales leurs valeurs en fonction des déviations :

$$2K\alpha_1 = r_1 P_1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{r_2}{R} + 1 \right) K(\alpha - \alpha')$$

d'où enfin on tire l'expression de la puissance fournie au transformateur

$$P_1 = \frac{K}{r_1} \left[2\alpha_1 - \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{r_2}{R} + 1 \right) (\alpha - \alpha') \right]$$

et la puissance absorbée dans le circuit d'utilisation sera :

$$P_2 = \frac{2K\alpha_2}{R}$$

On remarquera immédiatement l'analogie que présente cette méthode avec celle de M. Blakesley, que nous avons exposée plus haut; mais elle nous semble préférable à cette dernière, d'abord, par suite des avantages, mentionnés ci-dessus, que présente l'emploi de l'électromètre sur celui des électro-dynamomètres, et aussi parce qu'elle peut servir à mesurer la puissance fournie au transformateur lorsque le circuit secondaire est ouvert. On aura, en effet, dans ce cas $R = \infty$ et par conséquent :

$$P_1 = \frac{K}{r_1} \left[2\alpha_1 - \frac{n_1}{n_2} (\alpha - \alpha') \right]$$

Relativement à celle de M. Potier, cette méthode a l'avantage de ne pas impliquer la nécessité d'intercaler une résistance additionnelle.

M. De Bast. — La méthode du professeur Fleming comporte une cause d'erreur due à la self-induction de l'électro-dynamomètre placé en dérivation sur le circuit principal.

On pourrait la perfectionner en déduisant la valeur du courant dérivé des indications d'un voltmètre Cardew ou mieux d'un électromètre et de la connaissance de la résistance non inductive de la dérivation.

M. de Weydlich. — Rigoureusement parlant, on pourrait faire le même reproche à la méthode du professeur Ayrtton car, quoique la self-induction d'un voltmètre

Cardew soit certainement bien faible, sa résistance est faible aussi, en sorte que la constante de temps pourrait n'être pas négligeable.

M. L'Hoest. — Dans la méthode proposée par M. de Weydlich et qui consiste à connecter l'équipage mobile de l'électromètre successivement aux deux bornes du secondaire, les quadrants étant reliés aux bornes du primaire, il se pourrait que des différences de potentiel excessives soient observées, en d'autres termes que les deux déviations soient indéterminées ou même variables. Cela tiendrait à des valeurs inégales du potentiel moyen des deux circuits indépendants l'un de l'autre.

M. de Weydlich. — Pour éviter cet inconvénient, on peut réunir les points milieux des deux circuits par un conducteur. Afin de parer à des dérivations dues à des contacts accidentels en d'autres points, ce conducteur serait fait de fil fusible ou d'un fil à très-haute résistance, un fil de coton mouillé renfermé dans un tube de verre, par exemple.

La séance est levée à onze heures et demie.

CHRONIQUE.

Informations. — Nous apprenons que notre camarade M. Quinaux, vient d'être promu au grade de major d'artillerie et nommé sous-inspecteur des armes de guerre.

Les nouvelles installations de l'Institut électrotechnique Montefiore. — Depuis la création, en 1883, de l'Institut Montefiore, les cours et les exercices pratiques ont été suivis par un nombre d'élèves qui aujourd'hui atteint le chiffre de 201, parmi lesquels on compte 111 Belges, 28 Italiens, 13 Hollandais, 7 Espagnols, 6 Brésiliens, 6 Russes, 5 Français, 5 Anglais, 3 Allemands, 2 Américains (E.-U.), 2 Autrichiens, 2 Argentins, 2 Bulgares, 1 Grec, 1 originaire des Indes hollandaises et 1 du Nicaragua.

Le nombre des inscriptions annuelles allant en s'accroissant (dans la présente année il est de 33), les premières installations de l'Institut, si bien connues de nos lecteurs, étaient devenues absolument insuffisantes pour les travaux pratiques qui tiennent une très-large place dans l'enseignement qui y est donné.

D'autre part, les progrès incessants tant de la science que de l'application de l'électricité, nécessitaient des modifications et surtout une large extension des installations; il fallait notamment doter l'atelier, les laboratoires, les salles d'essais et de recherches du matériel et des appareils permettant de maintenir le rapport qui doit exister entre les travaux d'expérience et l'étude chaque année plus complète de la science.

Cédant à ces considérations, et sur l'initiative de M. Montefiore, le Gouvernement belge vient de mettre à la disposition de l'Institut le spacieux édifice de la rue St-Gilles, autrefois occupé par l'Ecole normale des Humanités, ainsi que les fonds nécessaires à son

appropriation. De son côté, M. Montefiore, par un acte de munificence plus généreux encore que les précédents, a voulu permettre de réaliser dans le nouvel Institut des installations incomparablement plus complètes et plus importantes que les premières.

Ces installations, qui ont été étudiées avec la compétence qu'on lui connaît par M. le professeur Eric Gerard, directeur de l'Institut, sont actuellement en cours d'exécution et seront terminées pour la réouverture des cours au mois d'octobre prochain.

Nous nous proposons d'en donner alors une description détaillée, mais nous croyons répondre au vœu de nos camarades en esquisant à grands traits et dès maintenant les dispositions du nouvel Institut.

L'excellente notice que notre camarade M. Bertolini a publiée sur l'Institut nous dispense d'entrer dans des détails sur les besoins de l'enseignement de cette école.

Rappelons seulement qu'indépendamment de l'enseignement technique général, il y est donné deux cours spéciaux, à savoir :

1° Le cours théorique approfondi de l'électricité et du magnétisme, complété par l'étude des méthodes et des moyens de mesure.

2° Le cours d'électrotechnique, subdivisé comme suit :

a) Etude des générateurs de courant et des transformateurs ;

b) Application de l'énergie électrique à l'éclairage, au transport de la force, à la traction et à la métallurgie ;

c) Examen des systèmes permettant de communiquer à distance.

Le côté caractéristique de l'enseignement de l'Institut est le grand développement donné aux travaux pratiques. Il est de principe d'y employer au moins une année entière, hormis le temps consacré à l'audition du cours. Ces travaux comprennent les travaux d'atelier, les mesures élémen-

taires, les mesures photométriques, l'essai des piles primaires et secondaires, des générateurs, des moteurs à courants continus et de ceux à courants alternatifs, des transformateurs, enfin les travaux spéciaux et les recherches.

Ces travaux se font dans l'ordre rationnel qui est indiqué ci-dessus et c'est là ce qui oblige à étendre les installations spéciales de telle sorte que chacune suffise à tous les élèves d'une même année.

. * .

La fig. 1 donne une vue d'ensemble du nouveau bâtiment de l'Institut: la distribution par étage est indiquée aux fig 2 et 3 qui donnent un aperçu des dispositions prises pour réaliser le programme que nous avons appelé succinctement.

Au rez-de-chaussée sont aménagés d'abord l'auditoire, la salle de conférences, le bureau du directeur et la salle des collections. Dans le fond, régnant sur toute la largeur de l'édifice, est l'atelier, largement pourvu des outils de la petite mécanique. Sur une des ailes sont les salles d'essai des petites dynamos, des moteurs, transformateurs, etc. Les machines plus puissantes sont essayées avec l'aide d'un moteur à vapeur dans une annexe G. Enfin, d'autres annexes recevront en H les machines dynamos de service, les chaudières en I, etc.

La salle des collections dont nous venons de parler, renferme un ensemble très-complet d'appareils de mesure mis à la disposition des élèves pour leurs essais et leurs recherches spéciales ainsi qu'un grand nombre de modèles servant aux démonstrations du cours. On y trouve aussi la bibliothèque de l'Institut, dont les ouvrages sont consultés par les élèves.

Dans l'atelier sont réunis tous les appareils employés pour le travail du bois et des métaux : tours de précision, scie, foreuse, forge, établis de menuisier, etc. Chaque

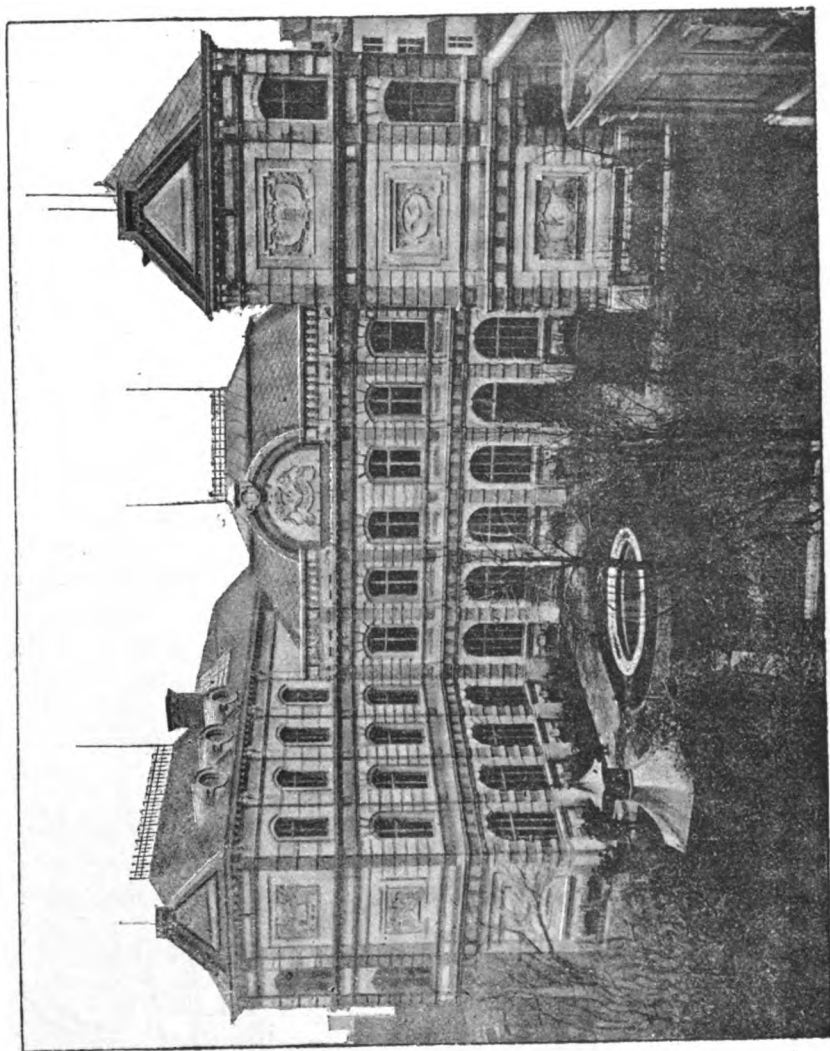


Fig. 1.

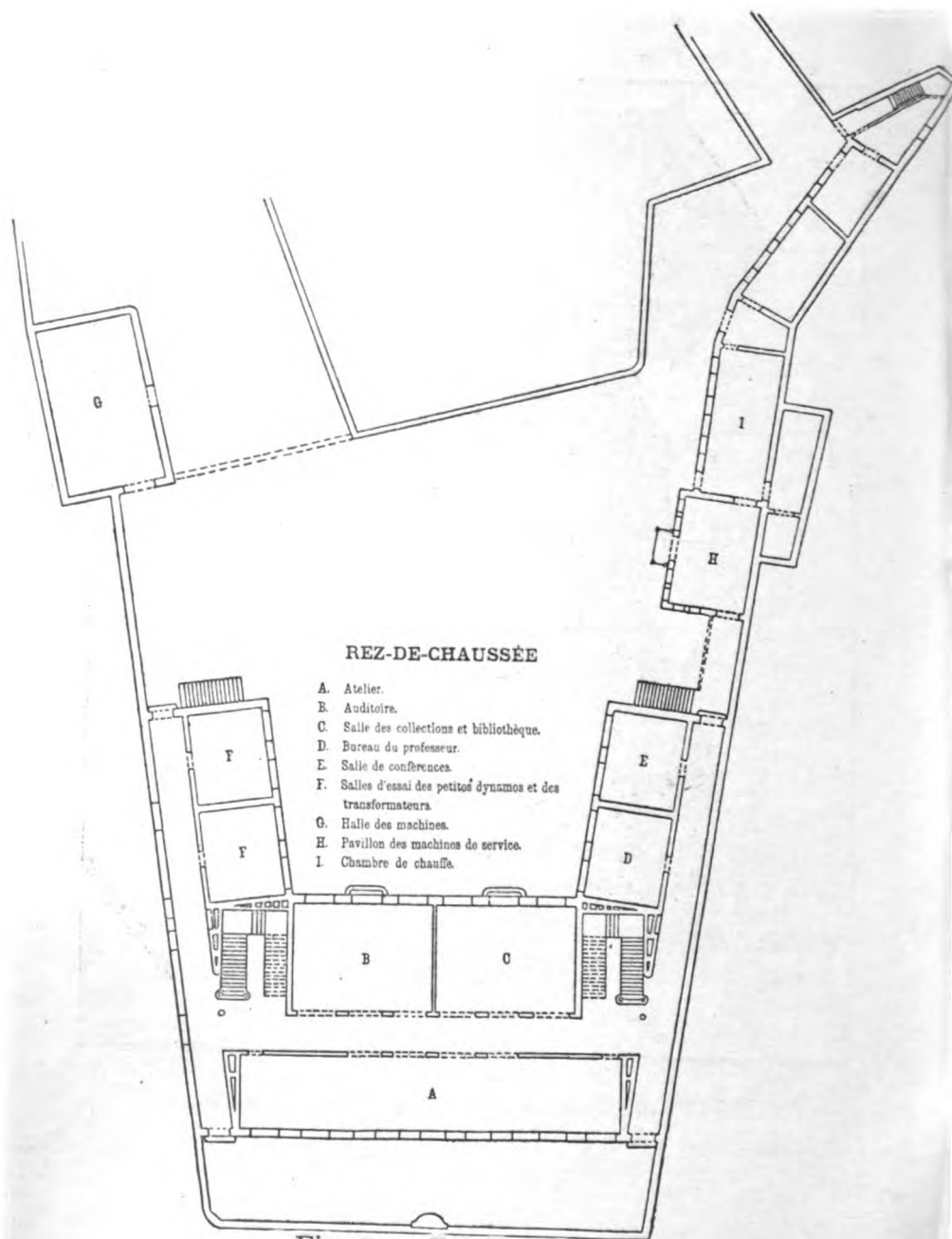
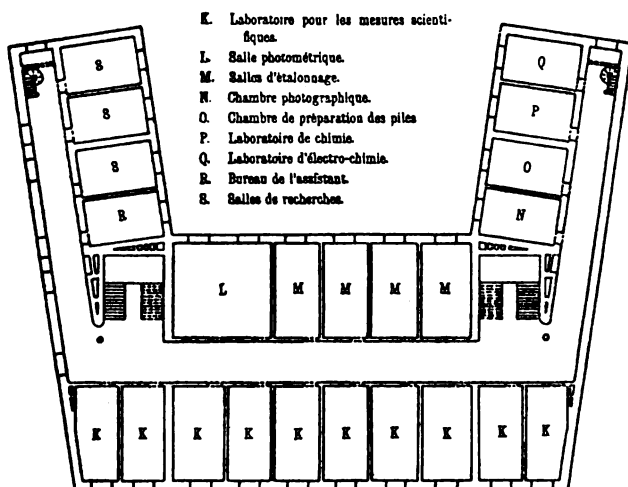


Fig. 2. — Echelle 1/500

PREMIER ÉTAGE



DEUXIÈME ÉTAGE

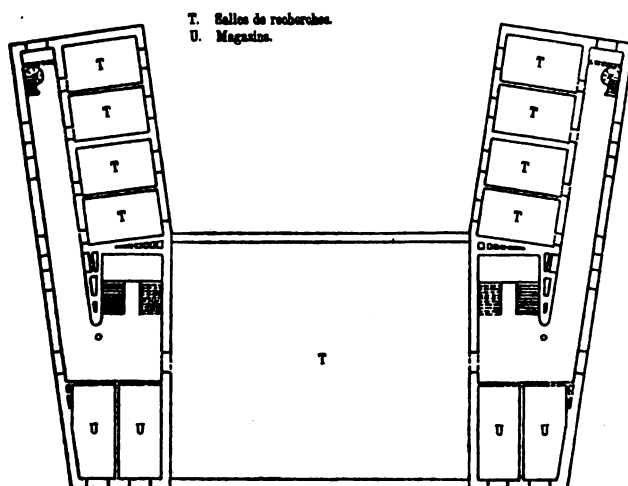


Fig. 3. — Echelle 1/500.

élève y possède son étau et son armoire à outils. Les engins mécaniques sont activés par deux électro-moteurs de 2 chevaux.

L'une des salles d'essai des petites machines est réservée aux dynamos à courant continu, l'autre aux alternateurs. Elles possèdent, comme puissance motrice, des électro-moteurs de 10 chevaux et sont pourvues de dynamomètres de transmission et d'absorption.

Les dynamos dont la puissance dépasse une dizaine de chevaux sont essayées dans la halle des machines. Dans celle-ci sont installés un moteur à vapeur horizontal de 30 chevaux et un moteur électrique de 20 chevaux qui peuvent attaquer séparément ou simultanément un arbre de transmission. Grâce à un dispositif spécial permettant une variation de 20 % de la vitesse des machines motrices, cet arbre, muni d'un jeu de poulies de diamètres décroissants, permet d'activer les dynamos à essayer à toutes les vitesses comprises entre deux limites très-écartées.

Afin de donner aux élèves l'image d'une distribution d'énergie électrique, on a réuni dans un pavillon séparé les machines qui assurent le service de l'éclairage de l'Institut ainsi que la marche des moteurs électriques disséminés dans ce dernier. Ces machines, au nombre de 2, l'une à vapeur de 15 chevaux, l'autre à gaz de 10 chevaux, actionnent des dynamos qui maintiennent en charge une puissante batterie d'accumulateurs où s'emmagasine l'énergie nécessaire à l'éclairage, à la force motrice et aux divers travaux de laboratoire.

Une chaudière tubulaire de 70 m² de chauffe (*) produit

(*) Cette chaudière est un don de M. Pierre Brouhon, le constructeur liégeois dont la réputation est trop connue pour qu'il soit besoin ici d'insister à cet égard. M. Brouhon, en faisant choix de la chaudière de locomotive, a partagé une opinion que nous avons défendue en différentes circonstances, à savoir que ce type est celui qui convient le mieux aux espaces restreints et qui associe à l'économie de construction, celle de la consommation de combustible.

Chaque type patenté de chaudière a ses parrains qui en exaltent les

la vapeur consommée par les moteurs à vapeur et le chauffage du bâtiment.

Ces installations permettront ainsi aux élèves de se familiariser avec la conduite des machines à vapeur et des générateurs et de faire des essais de régularité, de rendement et de consommation de ces appareils.

Le laboratoire des mesures scientifiques est situé au premier étage; il est subdivisé en une série de petites salles. Cette disposition a l'avantage d'isoler les divers groupes d'élèves de manière qu'ils ne puissent se gêner mutuellement. Comme annexes il comprend des laboratoires d'électro-chimie et de chimie, une salle de préparation des piles et une chambre photographique où s'effectuent des expériences d'enregistrement.

Une salle de photométrie, pourvue de photomètres de systèmes divers et les salles d'étalonnage occupent aussi cet étage. Ces dernières sont aménagées pour la graduation des appareils de mesure et leur comparaison avec les étalons.

Le deuxième étage est plus spécialement réservé aux recherches effectuées par le professeur, les assistants, les élèves les plus avancés et les personnes étrangères à l'Institut, qui, à raison de leurs connaissances spéciales, peuvent être autorisées par le Directeur, à poursuivre leurs investigations à l'aide du matériel de l'Institut. Il possède, entre autres, une très-grande salle permettant d'exécuter des expériences qui nécessitent un emplacement considérable.

qualités avec toute l'énergie que peut susciter l'intérêt. Il nous plaît de voir un constructeur reprendre la chaudière de Seguin, cette vieille orpheline dont l'abandon relatif, comme générateur fixe, tient sans doute à ce que peu de chaudronniers sont en état de la construire.

L'Institut doit sa reconnaissance à M. Brouhon pour sa libéralité; l'ingénieur y trouvera une indication sérieuse dans le choix du type que ce constructeur a fait avec sa compétence et la seule préoccupation de faire bien.

La salle de conférences mentionnée précédemment, recevra la bibliothèque de l'Association des ingénieurs électriciens sortis de l'Institut et servira aux réunions mensuelles de celle-ci.

Par ce court aperçu, nos lecteurs auront pu se rendre compte de l'importance considérable acquise par les installations matérielles de l'Institut.

Nous ne parlerons pas ici de l'enseignement qui y est donné; chacun de nous a pu en apprécier la haute valeur et a emporté de son séjour à l'Institut la conviction que la confiance du Gouvernement ne pouvait être mieux placée que dans l'éminent professeur qui a assumé la tâche de créer cet enseignement.

Spécialistes formés par l'Institut, nous applaudissons tous aux nouveaux sacrifices que se sont imposés l'Etat et M. le sénateur Montefiore et nous saisissons cette occasion de leur en exprimer toute notre reconnaissance.

G. L.

Manifestation du 28 juin en l'honneur de M^r et M^{me} Montefiore, à l'occasion de leurs noces d'argent.

— La libéralité consiste moins à donner beaucoup qu'à donner à propos, a dit un grand penseur. Si dans cette grande bienfaisance dont M^r et M^{me} Montefiore donnent un si bel exemple, nous admirons l'étendue des sacrifices que leur cœur leur inspire, nous apprécions plus encore avec quel esprit judicieux ils savent mesurer leurs bienfaits et les diriger vers un but humanitaire ou utile à tous.

Une cérémonie familiale, les noces d'argent de M^r et M^{me} Montefiore a fourni enfin l'occasion de témoigner aux jubilaires la gratitude publique pour leur noble générosité et leur inépuisable bienfaisance.

En tête du cortège extraordinairement nombreux des municipalités, des Sociétés de sciences, d'art, de bienfaisance, d'agrément, etc., qui, le 28 juin dernier, venaient offrir à M^r et M^{me} Montefiore leurs congratulations et l'expression de leur reconnaissance, avaient pris place

l'Institut électro-technique et notre Association représentée par quarante-sept de ses membres.

M. le professeur Eric Gerard, dans son allocution, a rappelé tout ce que l'Institut Montefiore devait à son fondateur lequel, sans limiter son action à l'octroi des dons princiers qu'il a faits à son œuvre, a prodigué ses soins et sa haute influence pour en assurer l'avenir et la grandeur.

Notre président, M. de Weydlich, en remettant aux jubilaires un album des portraits des membres de notre Association, a prononcé le discours suivant :

*Monsieur le Président d'honneur,
Madame,*

Notre Association est heureuse de pouvoir participer aux nombreux témoignages de sympathie, de reconnaissance et de profonde estime qui vous sont exprimés de toutes parts à l'occasion de vos noces d'argent.

A une époque où l'on doutait encore des services imminents que la science électrique était appelée à rendre, votre clairvoyance a compris la haute utilité d'un enseignement spécial destiné à donner à l'industrie électrique des ingénieurs compétents qui lui manquaient.

C'est alors qu'avec l'appui de votre haute influence et le secours d'une munificence qui surmonta tous les obstacles, fut créé ce bel Institut placé sous votre patronage, dont la renommée s'accroît chaque jour aussi bien en Belgique qu'à l'étranger.

Le groupe d'ingénieurs formés par cet Institut n'a pas tardé à se sentir assez nombreux pour constituer une Société qui, elle aussi, doit à vos multiples et précieux encouragements, le développement qu'elle prend de jour en jour et la place qu'elle a déjà conquise dans les Sociétés scientifiques.

Parmi ces encouragements, celui qui, à nos yeux, devait avoir la plus grande valeur, était de vous voir accepter la présidence d'honneur de notre jeune Association. Fiers de

cette marque de confiance que vous nous avez accordée, nous nous empressons de venir aujourd'hui pour vous présenter, avec nos vœux les plus chaleureux, le témoignage de notre profonde gratitude.

Ces sentiments de générosité de notre Président d'honneur, auxquels le pays doit déjà tant de choses utiles, nous n'ignorons pas, Madame, combien vous les partagez ; si discrètes qu'en soient les manifestations, elles sont trop répétées pour qu'elles puissent rester inconnues.

Dans leurs visites au Rond-Chêne où ils ont reçu un accueil si bienveillant et si gracieux, les anciens élèves de l'Institut Montefiore ont respiré cette atmosphère de bienfaisance qui vous entoure et dont l'influence se traduit sous tant de formes diverses.

Aussi, cet album que notre Association vous prie d'accepter en souvenir de cette heureuse journée sera en même temps un témoignage de reconnaissance pour notre Président d'honneur et un hommage rendu à vos nobles sentiments, Madame.



M. Montefiore, dans une très-heureuse improvisation, a félicité M. le professeur E. Gerard de la renommée que les brillants résultats obtenus ont déjà acquis à l'Institut ; il est heureux, d'ailleurs, de constater l'autorité que son jeune directeur a conquise dans le monde savant.

Il a fait ensuite ressortir la grande utilité de l'Association des anciens élèves de l'Institut qui, née d'hier, a déjà su donner des preuves sérieuses de vitalité ; en terminant, il a encouragé tous ceux qui se sont dévoués à cette institution à persévérer dans leurs efforts pour accroître encore la réputation de notre Société.

La réception des délégations s'est poursuivie pendant deux heures. Nous ne pouvons entreprendre le récit de cette cérémonie à la fois touchante et imposante, par laquelle toute une population a voulu témoigner son attachement et sa reconnaissance à M^r et M^{me} Montefiore.

G. L.



A la suite de la visite dont nous venons de rendre compte, notre Président d'honneur a bien voulu nous adresser la gracieuse lettre que nous reproduisons ci-après :

Château du Rond Chêne, 3 Juillet 1891.

A l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut
Electro-technique Montefiore, Liège.

Messieurs,

L'émotion qui s'est emparée de Madame Montefiore et de moi en présence de la grandiose manifestation que nous avaient ménagée nos amis, ne nous a pas permis de vous remercier, comme nous l'aurions désiré, des vœux et des félicitations que vous avez bien voulu nous apporter à l'occasion de nos noces d'argent, du splendide bouquet et du magnifique album dont vous nous avez fait hommage et dont le prix se double à nos yeux de la difficulté que vous avez dû éprouver de réunir ainsi les portraits de camarades dispersés aujourd'hui sur tous les points du globe.

Sans pouvoir accepter sans réserve les éloges contenus dans l'adresse, aussi bien pensée que dite, de votre dévoué Président, nous tenons à vous répéter combien nous avons été profondément touchés de votre si aimable démarche. Si quelque chose pouvait resserrer les liens qui nous unissent déjà à votre jeune Association, sa participation à l'inoubliable fête du 28 juin accroîtra encore l'intérêt sincère que nous lui portons de toute l'étendue de notre reconnaissance.

Merci, Messieurs, du fond du cœur, merci et croyez à la nouvelle expression de nos meilleurs sentiments.

G. MONTEFIORE LEVI,
SÉNATEUR.

Bulletin de la Société belge d'électriciens, n° 6. — Cette publication nous donne connaissance du rapport de la Commission chargée par la dite Société de l'examen de

la question de créer un *laboratoire d'électricité*. On y rappelle que le 7 mai 1890, M. Montefiore a exposé au Sénat belge la nécessité d'établir un bureau officiel d'étalonnage pour les appareils électriques. Cette nécessité n'est certes pas à démontrer à des électriciens ; nous nous bornerons donc à examiner la solution présentée par la Commission de la Société belge d'électriciens.

Le type de bureau d'étalonnage que M. le sénateur Montefiore a eu en vue, dans son discours, est assez exactement celui du Reichsanstalt, bureau voisin de l'Institut électro-technique de Berlin, qui toutefois poursuit un but tout différent de cet Institut. On y procède en effet à tous les étalonnages électriques, acoustiques, thermiques, mécaniques, etc., mais on n'y a établi ni laboratoire de recherches, ni installations propres à l'éducation d'élèves.

A Paris, le laboratoire de la place St-Charles ne fait guère que les étalonnages électriques ; on y admet bien les personnes qui désirent entreprendre des recherches spéciales mais, à notre connaissance, on n'a guère usé de cette faculté, sauf peut-être pour la répétition des expériences de Hertz.

La Belgique, déjà dotée d'un Institut électro-technique, doit-elle prétendre à un établissement d'étalonnage aux visées beaucoup plus larges que ses puissants voisins, établissement où on installerait avec le conservatoire des étalons et le laboratoire d'étalonnage, des salles de recherches et même une école d'électriciens ? Ce serait évidemment demander trop et courir à un échec.

Nous sommes trop désireux de voir les succès couronner les efforts de nos collègues de la Société belge d'électriciens pour ne pas les engager à limiter leur demande à ce qui répond à un besoin réel ; bornons-nous donc au bureau d'étalonnage auquel on pourrait peut-être adjoindre des salles de recherches, bien que celles-ci feraient double emploi avec celles qui seront accessibles aux spécialistes dans les nouveaux locaux de l'Institut Montefiore.

G. L.

SÉANCE DU 25 OCTOBRE 1891.

—
Présidence de M. de Weydlich, président.
—

Etaient présents MM. Arendt, Bourquin, Colard, De Bast, Farman, Francken, Gerard Eric, Gourghenbekoff, Grottendieck, Henrard, Larmoyer, L'Hoest, Libert, Masson, Mélotte, Nagtglas-Versteeg, Orban, Roosen, du Welz, de Weydlich.

Le procès-verbal de la séance du 28 juin est approuvé.

M. de Weydlich, *président*, notifie à l'assemblée l'inscription en qualité de membres effectifs de MM. Andringa, Coune, Dawson, Farman, Francken, Gritters, Gourghenbekoff, de Jonge, Keiffenheim, Nagtglas-Versteeg, de Ryckere, Scaramanga et Van der Goot.

M. L'Hoest, *secrétaire-général*. — Conformément à ce qui a été résolu en séance du 26 octobre 1890, les votes par correspondance ont lieu cette année, non-seulement pour l'élection du président, mais encore pour celle de tous les membres du Comité dont le mandat expire le 1^{er} novembre prochain.

Avant qu'il soit procédé au dépouillement des bulletins qui nous sont parvenus, je désire appeler votre attention sur un point défectueux du système.

Aux termes des statuts, le Président doit être choisi parmi les quatre vice-Présidents de l'année précédente : ceux de nos camarades qui votent par correspondance, composent le bulletin de vote pour la vice-présidence en excluant naturellement de la liste le vice-président sortant qu'ils proposent à la présidence. Il en résulte que si ce candidat n'est pas élu président, il perd autant de voix pour la vice-présidence qu'il lui en a été donné pour la présidence.

Le moyen de parer à cette difficulté est de faire les deux élections, non plus simultanément, mais à un tel intervalle que chacun connaisse le résultat de la première avant de composer son bulletin pour la seconde.

D'autre part, l'usage s'étant établi d'inaugurer l'année sociale par une adresse présidentielle, il convient de donner au nouvel élu un temps suffisant pour préparer son discours.

Aucune disposition statutaire n'y faisant obstacle, je propose, pour l'avenir, de procéder à l'élection du président dans la première séance de juin de l'année sociale précédant celle pour laquelle le mandat est à conférer.

Adopté à l'unanimité.

M. de Weydlich, président. — Le premier objet à l'ordre du jour est l'élection des membres sortants du Comité.

M. L'Hoest, secrétaire-général. — Je dépose entre les mains du Président les bulletins de vote qui me sont parvenus sous enveloppe de MM. Andringa, Barberis, Bertemati, Bertolini, Chantraine, Chaudoir, Coune, Cruciani, Demany, Emile Gérard, Haesen, Hénnard, de Jonge, Libert, Minsier, Pescetto, Picazo, Piérard, Quinaux, de Ryckere, Santarelli, Scaramanga, Turconi, Van der Goot, Van Vloten, de Weydlich.

Quarante membres effectifs prennent part à l'élection du Président.

M. Demany ayant obtenu vingt-quatre voix est proclamé Président de l'Association pour l'année sociale 1891-1892. (*Applaudissements*).

L'assemblée procède ensuite à l'élection des vice-Présidents et des Commissaires. Sont élus MM. de Weydlich, De Bast, Pescetto et Libert, en qualité de vice-Présidents, et MM. Francken, Hennard et Grotten-dieck, en qualité de Commissaires.

La parole est ensuite donnée à M. De Bast qui fait à l'assemblée la communication suivante :

**Les électro-moteurs à champ magnétique
rotatoire.**

Il est inutile d'insister encore sur la nécessité de l'emploi des hautes tensions pour le transport électrique de la puissance dans des conditions économiques. On sait aussi que les dynamos à courant continu, munies de collecteurs du genre Gramme, se prêtent mal à l'obtention de différences de potentiel considérables. D'ailleurs il est fort difficile de maintenir en bon état l'isolement d'un conducteur parcouru par un courant continu, par suite de l'action décomposante lente qu'un tel courant exerce sur les isolants. Or la question de l'isolement a une importance capitale quand il s'agit de hautes tensions, tant au point de vue de la sécurité des personnes, qu'au point de vue du bon fonctionnement de la transmission.

Les courants alternatifs ne présentent pas les mêmes inconvénients. En outre ils possèdent l'avantage de pouvoir, à l'aide des transformateurs, être transformés sans grande perte : il devient ainsi possible de limiter à la ligne les tensions dangereuses et de réduire à une valeur inoffensive et très maniable les différences de potentiel agissant dans les alternateurs et mises à la portée des consommateurs d'énergie électrique. Mais les alternateurs ordinaires, employés comme moteurs, sont inférieurs aux dynamos à courant continu : ils ne démarrent pas spontanément.

Ce défaut n'existe pas dans une classe nouvelle de machines à courants alternatifs que l'on peut appeler alternateurs à champ magnétique rotatoire. Dans ces derniers temps, la presse scientifique s'est occupée à plusieurs reprises de ces machines dont la théorie

mathématique n'est encore établie que d'une façon fort incomplète, mais qui, en ce moment, présentent un intérêt tout spécial par suite de ce fait que l'Exposition internationale d'électricité de Francfort en possédait plusieurs types qui ont été soumis à des essais sérieux.

Nous espérons donc être agréables à nos lecteurs en exposant d'une manière fort succincte et aussi élémentaire que possible les principes sur lesquels est basé le fonctionnement de ces appareils et les dispositions principales qui ont été utilisées dans leur construction.

On se rappelle l'expérience d'Arago : un disque de cuivre tournant autour d'un axe central perpendiculaire à son plan entraîne dans son mouvement une aiguille de déclinaison placée dans le voisinage au dessus ou au dessous de lui. En modifiant légèrement les conditions d'expérimentation, il est aisé de mettre en évidence le principe fondamental des électro-moteurs à champ tournant.

Considérons un aimant puissant en fer à cheval disposé verticalement et mobile autour d'un axe parallèle à ses branches et situé entre celles-ci. Au dessus des pôles se trouve un disque horizontal léger de cuivre ou mieux de fer reposant par son milieu sur un pivot. Si l'on imprime à l'aimant un mouvement de rotation rapide, on constate que le disque se met à tourner dans le même sens avec une vitesse angulaire croissante qui tend à égaler celle de l'aimant.

L'explication de ce phénomène est fort simple : le disque métallique est plongé dans un champ magnétique dont la direction en chaque point décrit un cercle autour de l'axe de rotation de l'aimant ; les lignes de force de ce champ se déplaçant ainsi à travers la masse du disque y provoquent des courants tourbillonnaires de Foucault qui réagissent mécaniquement sur le flux magnétique. Le sens de cette réaction est défini par la loi de Lenz : l'induction électro-magnétique gêne le mouvement qui la produit. On voit donc que les courants induits dans le disque tendent

à arrêter le mouvement de l'aimant ; ce mouvement étant entretenu par une dépense spéciale d'énergie, c'est le disque qui est entraîné.

Comme l'appareil que nous venons de décrire, les électro-moteurs à champ magnétique rotatoire comportent deux parties principales : un inducteur créant le champ tournant et un induit soumis à l'induction électro-magnétique de ce dernier.

L'induit n'est pas en général constitué par un simple disque ou cylindre métallique massif : ainsi que l'a fait observer M. Kapp, le rendement d'une telle machine serait en effet très mauvais. Les courants induits affectent dans ce cas des configurations fort compliquées dont toutes les parties ne présentent pas la même efficacité au point de vue de l'action dynamique qui s'exerce entre l'inducteur et l'induit et dont quelques unes, inutiles sous ce rapport, constituent une pure perte d'énergie en chauffant l'induit. On préfère, en conséquence, composer celui-ci d'un enroulement de fils conducteurs isolés, fermés sur eux mêmes et disposés de manière que les courants dont ils deviennent le siège circulent suivant les directions les plus favorables. Cet enroulement est d'ailleurs avantageusement supporté par une carcasse en fer doux, destinée à concentrer le champ magnétique en diminuant la résistance du circuit où règne le flux. Il convient que le noyau soit feuilleté, pour éviter les courants de Foucault parasites.

Nous aurons, dans le courant de cette étude, l'occasion de décrire plusieurs types d'induits de ce genre.

Voyons maintenant comment, dans les alternateurs industriels, on engendre le champ magnétique tournant : il ne s'agit nécessairement plus ici d'aimants permanents ou d'électro-aimants animés d'un mouvement de rotation.

Soit un inducteur (fig. 1) constitué par la juxtaposition d'une série de tôles de fer verni, découpées suivant la

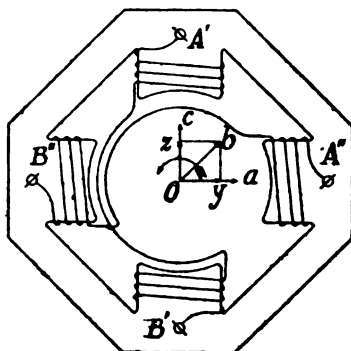


Fig. 1.

forme figurée. Sur deux projections polaires opposées A' , B' sont enroulées des bobines magnétisantes telles qu'un courant continu, les traversant en série, déterminerait des pôles magnétiques de noms contraires aux extrémités en regard. En d'autres termes ces bobines concourent à la production d'un flux magnétique dont la direction générale est parallèle à leur axe commun. Les deux autres projections A'' , B'' sont munies d'un enroulement semblable.

Supposons que dans les conducteurs A' B' circule un courant alternatif dont les variations périodiques d'intensité sont représentées par une fonction sinusoïdale simple du temps et que les bobines A'' B'' reçoivent un courant identique, mais dont les phases sont en retard sur celles du premier courant d'une durée $\frac{T}{4}$ égale à un quart de période. Nous pouvons admettre que, dans ces conditions, l'espace compris entre les quatre pôles inducteurs est soumis à l'action de deux champs magnétiques, que nous supposerons uniformes, dont les intensités à chaque instant sont données par des formules respectivement de la forme

$$h' = H \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$h'' = H \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

En un point quelconque de l'espace considéré, en son centre O par exemple, les deux champs, normaux entr'eux, se composent suivant une résultante dont la grandeur, la direction et le sens sont déterminés par le théorème du parallélogramme des forces. On voit immédiatement que, dans l'hypothèse où nous nous sommes placés, l'intensité de cette résultante reste constante. En effet, quelle que soit la valeur de t ,

$$h = \sqrt{h'^2 + h''^2} = H \sqrt{\sin^2 \frac{2\pi}{T} t + \cos^2 \frac{2\pi}{T} t} = H.$$

Examinons ce que devient l'orientation de cette résultante pendant une période des courants inducteurs.

Au temps $t = 0$, on trouve que $h' = 0$ et $h'' = H$. A ce moment donc la résultante h coïncide avec h'' et peut être représentée par le vecteur Oa dont la longueur est proportionnelle à H .

Un huitième de période après, pour $t = \frac{T}{8}$, on obtient

$$h' = H \sin \frac{\pi}{4} = \frac{H}{\sqrt{2}}, \text{ figuré par la droite } Oz \text{ et}$$

$$h'' = H \cos \frac{\pi}{4} = \frac{H}{\sqrt{2}} = Oy. \text{ La résultante } Ob \text{ occupe}$$

maintenant une position faisant avec la première un angle de 45° .

Quand $t = \frac{T}{4}$, $h' = H = Oc$, $h'' = 0$ et h se confond avec h' . Pendant un temps égal à un quart de période la direction de la résultante a donc tourné d'un angle droit.

On verrait aisément en poursuivant ce raisonnement, qu'au point O le champ magnétique résultant effectue une

rotation complète sur lui même en $\frac{1}{N}$ secondes, N étant la fréquence des courants périodiques.

En chaque point de l'espace interpolaire, le même phénomène se produit et, si les deux champs créés par les bobines magnétisantes sont uniformes, le champ résultant aura partout la même orientation au même instant. L'effet est le même que si un flux magnétique de grandeur constante était animé, normalement à sa direction, d'un mouvement rotatoire continu s'effectuant autour d'un axe perpendiculaire au plan de la fig. 1 et projeté en O. Nous signalerons plus loin les restrictions qu'il y a lieu d'apporter à ces conclusions pour rester dans les conditions réelles des machines industrielles.

Un système de conducteurs métalliques convenablement disposés, introduit entre les pôles de l'inducteur dont il vient d'être question, prendra, comme nous le savons, un mouvement de rotation dans le sens du déplacement du flux tournant. Il ne sera pas inutile, peut-être, de vérifier encore une fois ce fait, en considérant maintenant un type déterminé d'induit de ce genre.

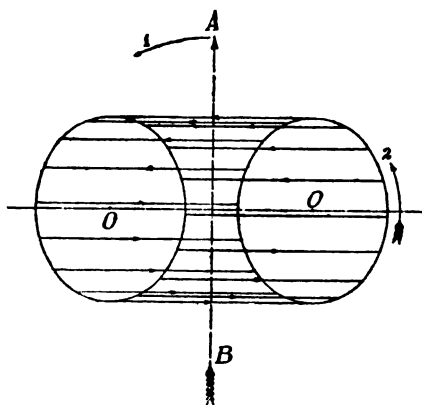


Fig. 2.

Parmi ces armatures, une des plus simples est celle utilisée par M. von Dolivo Dobrowolski, croyons-nous, dans ses premières machines. Elle se compose (fig. 2) d'une série de barres de cuivre groupées suivant les génératrices d'un cylindre et dont les extrémités sont réunies métalliquement entr'elles aux deux bouts par un cercle du même métal.

Lorsque les lignes de force magnétique, tournant autour de l'axe OO de l'armature dans le sens de la flèche 1, sont, pendant un instant, parallèles à une direction AB et dirigées de B vers A , nous pouvons, par la pensée, partager les conducteurs induits en deux groupes séparés par un plan axial normal à la droite AB . L'application de la règle de Faraday montre qu'à ce moment les deux séries de conducteurs sont le siège de forces électro-motrices de sens inverses indiqués par les têtes de flèche et d'autant plus grandes que ces conducteurs sont plus rapprochés du plan BOA . Les courants engendrés réagissent sur le flux magnétique et il est aisé de constater, en faisant usage de la règle d'Ampère, que cette réaction électro-magnétique entraîne l'induit dans le sens de la flèche 2, c'est-à-dire à la suite du flux.

Les mêmes conditions se reproduisent pour chaque orientation de la droite AB représentative du champ : l'armature tournera donc d'un mouvement continu et développera, une fois le régime de vitesse établi, un couple dynamique constant dans le tour si le champ inducteur rotatoire reste uniforme.

Un induit constitué par quelques bobines rectangulaires de fil conducteur, fermées sur elles mêmes et situées régulièrement suivant les plans diamétraux d'un tambour cylindrique, se comporterait identiquement.

Il nous faut maintenant examiner comment on peut produire les deux courants diphasés nécessaires au fonctionnement des électro-moteurs que nous étudions,

Le moyen qui se présente immédiatement à l'esprit consiste à employer une génératrice à courants alternatifs dont l'induit présente deux circuits distincts ainsi disposés, par rapport aux pôles alternés de la carcasse inductrice, que les bobines de l'un des circuits tombent entre deux projections polaires consécutives, quand celles du second sont devant ces dernières. On reproche à ce système la nécessité d'employer quatre fils de ligne pour relier les machines génératrices et réceptrices. On peut, il est vrai, utiliser pour les deux circuits un fil de retour commun ; mais cela n'est pas sans présenter des inconvénients dans certains cas.

Quelques électriciens ont tenté de résoudre le problème en faisant usage de deux fils de transmission seulement. Une solution très élégante, mais qui ne peut convenir que pour des moteurs de très faible puissance, a été appliquée par M. Shallenberger dans la construction de son coulombmètre pour courants alternatifs. Cet appareil se compose essentiellement de deux bobines horizontales, ayant la forme de cadres galvanométriques et dont l'une, fermée en court-circuit sur elle-même, est placée à l'intérieur de l'autre et fait avec celle-ci un angle d'environ 45° . Le courant périodique à mesurer traverse cette dernière bobine. Ce courant

$$i = I \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

agissant par induction sur les spires de la bobine fermée, y excite une force électro-motrice

$$e' = -n' M \frac{di}{dt} = -\frac{2\pi}{T} n' M I \cos \frac{2\pi}{T} t = -E' \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

M étant le coefficient d'induction mutuelle des deux bobines et n' le nombre des spires de la bobine induite. A cause de la self-induction L' de la bobine fermée de résistance R' , cette force électro-motrice produit un courant d'induction

$$i' = \frac{-E'}{\sqrt{R'^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} L'^2}} \cos \frac{2\pi}{T} (t - \theta) = -I' \cos \frac{2\pi}{T} (t - \theta)$$

On voit par ces formules que le courant unique, envoyé dans l'une des bobines de l'appareil, induit dans l'autre bobine un courant de même fréquence, d'intensité efficace généralement différente et diphasé en arrière du premier de plus d'un quart de période. Ces deux courants déterminent donc dans l'espace intérieur des bobines un champ magnétique rotatoire, mais dont l'intensité subit, pendant la révolution, une variation périodique. Nous laissons à nos lecteurs le soin de s'en assurer par une construction graphique analogue à celle que nous avons utilisée précédemment.

M. Tesla a proposé le moyen suivant pour transmettre au moteur à champ tournant par deux fils de ligne seulement l'énergie développée par la machine génératrice. Celle-ci est un alternateur ordinaire débitant un seul courant périodique.

Les deux enroulements inducteurs de l'électro-moteur sont dérivés sur les deux conducteurs constituant le circuit de transmission. L'un de ces enroulements est formé d'un grand nombre de spires de gros fil, de manière à posséder un grand coefficient de self-induction L et une faible résistance r : ainsi la constante de temps $\frac{L}{r}$ de cette dérivation peut être considérable et le courant qui parcourt celle-ci est en retard d'un temps

$$\theta' = \frac{T}{2\pi} \arctan \frac{2\pi L}{Tr}$$

sur la différence de potentiel maintenue aux bornes du moteur.

Le second enroulement présente un petit coefficient de self-induction l et une grande résistance R , grâce, par exemple, à l'intercalation dans cette dérivation d'un rhéostat non inductif. Le retard de la phase du courant circulant dans cet enroulement sur celle de la différence de potentiel est ainsi

$$\theta'' = \frac{T}{2\pi} \arctan \frac{2\pi l}{TR}.$$

Comme $\frac{L}{r} > \frac{l}{R}$ il existe entre les deux courants dérivés un décalage des phases correspondant à un temps

$$\theta = \theta' - \theta''$$

dont la valeur théorique maxima, donnée par les conditions $L = \infty$ et $l = 0$, peut atteindre un quart de période. En effet

$$\theta_{\max} = \frac{T}{2\pi} (\text{arc tg } \infty - \text{arc tg } 0) = \frac{T}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right) = \frac{T}{4}$$

Ainsi se trouvent encore réalisés les deux courants diphasés nécessaires à la production du champ rotatoire. Comme cette méthode ne permet pas d'obtenir pratiquement un écart des phases des deux courants égal à $\frac{T}{4}$, l'intensité du champ tournant n'est pas constante en chaque point, mais y subit, comme dans le cas précédent, des fluctuations de grandeur répétées.

MM. Leblanc et Hutin sont arrivés au décalage le plus avantageux, d'un quart de période, des deux courants dérivés l'un par rapport à l'autre, en donnant à l'un des circuits un certain coefficient de self-induction et en insérant dans l'autre circuit un condensateur de capacité convenable C. Le courant circulant dans le premier circuit est de cette façon en retard d'un temps déterminé θ' sur la différence de potentiel maintenue aux bornes communes. Le décalage du second courant est, au contraire, de sens inverse, c'est-à-dire que les phases de ce courant sont en avance sur celles de la différence de potentiel. Car, si l'on se rappelle que l'effet d'une capacité C intercalée dans un circuit parcouru par des courants périodiques est le même que celui d'une self-induction négative de valeur absolue $\frac{T^2}{4\pi^2 C}$, on voit que le retard du courant sur la différence de potentiel est exprimé par

$$\theta'' = \frac{T}{2\pi} \text{arc tg } \frac{2\pi}{TR} \left(L - \frac{T^2}{4\pi^2 C} \right),$$

L et R étant le coefficient de self-induction et la résistance du circuit considéré. Il suffit, pour que ce retard soit négatif, que l'on ait

$$\frac{2\pi}{TR} \left(L - \frac{T^2}{4\pi^2 C} \right) < 0$$

ou bien

$$\frac{4\pi^2}{T^2} CL < 1.$$

Et on peut donner à C une valeur telle que $\theta' - \theta'' = \frac{T}{4}$.

Remarquons en passant que cette relation est satisfaite par des valeurs de C d'autant plus faibles que la fréquence du courant $\frac{1}{T}$ est plus grande. La solution en question est donc surtout avantageuse avec les courants de courtes périodes. On peut lui objecter que, jusqu'à présent tout au moins, la construction de condensateurs industriels n'est pas s'en présenter de sérieuses difficultés. Cependant MM. Leblanc et Hutin sont déjà parvenus à produire, par un procédé de formation graduelle, des condensateurs supportant bien des tensions assez élevées et dont le diélectrique est constitué par une matière bon marché, telle que le papier paraffiné.

Il est aisé, au moyen d'un dispositif auxiliaire fort simple, de faire produire à une dynamo à courant continu ordinaire, munie d'un anneau Gramme, deux différences de potentiel périodiques décalées exactement d'un quart de phase. Il suffit, ainsi que l'ont fait MM. Schuckert et C^{ie} de Nuremberg, de munir l'induit d'un second collecteur constitué par quatre bagues métalliques juxtaposées, sur chacune desquelles frotte un balais. Ces balais servent deux à deux à recueillir les deux courants diphasés.

Considérons en effet (fig. 3) un anneau de fer feuilleté, garni d'un enroulement continu de fil de cuivre isolé et animé d'un mouvement de rotation entre les deux épauissements polaires d'un système inducteur. Quatre

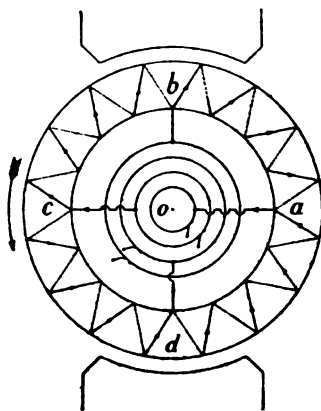


Fig. 3.

points *a*, *b*, *c*, *d* de cet enroulement, distants d'un écartement angulaire de 90° , sont reliés chacun à l'une des bagues du nouveau collecteur. Quelle que soit la position de l'armature, les moitiés de l'enroulement, situées de part et d'autre de la droite perpendiculaire à la ligne des pôles et à l'axe *O*, sont le siège de forces électro-motrices résultantes concourantes et la distribution du potentiel le long des deux séries de spires est la même et est symétrique par rapport à cette droite. La différence de potentiel est donc maxima entre les deux points où celle-ci touche l'enroulement induit; elle est nulle entre les points où la ligne des pôles rencontre ce dernier. Dans la position de l'armature figurée, les points *a* et *c* se trouvent précisément dans la première situation: la différence de potentiel existant entre les deux bagues qui leur correspondent va donc en diminuant à mesure que la rotation se poursuit, est nulle après un quart de tour, puis, changeant de signe, repasse par un maximum 90° plus loin, pour s'annuler ensuite de nouveau et reprendre enfin sa valeur primitive. Une période de la différence de potentiel correspond ainsi à une révolution complète de la dynamo. Les mêmes variations

s'observent entre les bagues reliées aux points b et d , mais comme ceux-ci sont décalés de 90° par rapport aux précédents, les phases de la seconde différence de potentiel diffèrent d'un quart de période de celles de la première.

On reconnaît facilement que rien n'empêche de dériver un courant à la fois de chacune des paires de frotteurs reposant sur les bagues unies et des balais placés suivant la ligne neutre sur le collecteur Gramme à touches. Ce dernier courant étant continu peut servir à l'excitation des électro-aimants inducteurs: la machine Schuckert constitue donc un alternateur auto-exciteur produisant deux courants diphasés.

Bien plus, elle est réversible et fonctionne aussi comme électro-moteur.

Si l'on envoie dans l'armature, par les bagues dessinées extérieurement, un courant périodique

$$i' = I \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

et, par les bagues intérieures, un courant

$$i'' = I \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

l'anneau développe un flux magnétique rotatoire. Car, comme au temps $t = 0$, on a $i' = 0$ et $i'' = I$, à ce moment la distribution des courants est celle représentée par la fig. 3 et les lignes de force engendrées par les spires magnétisantes cda et cba déterminent, vers l'extérieur du noyau, en s'échappant pour se fermer sur elles-mêmes à travers la carcasse environnante, deux pôles contraires, à la hauteur des points c et a .

Après un huitième de période, quand $t = \frac{T}{8}$,

$$i' = \frac{I}{\sqrt{2}} \text{ et } i'' = \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

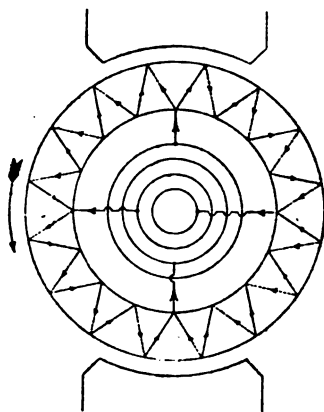


Fig. 4.

On voit (fig. 4) qu'alors les deux courants s'ajoutent dans les quadrants *cd*, *ba* et se neutralisent, au contraire, en *cb*, *da* : les pôles sont donc situés vers le milieu des arcs *cb* et *da* d'où émerge maintenant le flux.

Plus tard, $t = \frac{T}{4}$, $i' = I$, $i'' = 0$ et les pôles viennent en *b* et *d*.

Il est inutile d'insister davantage pour montrer que pendant une période des courants, les pôles se déplacent tout autour de l'armature, dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, en donnant l'essor à un flux magnétique qui tourne avec eux. Ce flux, en balayant les pièces polaires non excitées de la carcasse, y induit des courants tourbillonnaires dont la réaction électro-magnétique tend à entraîner ces masses dans le mouvement du flux. Comme la carcasse est fixe, c'est l'armature elle-même qui se met à tourner en sens inverse c'est-à-dire suivant l'orientation de la flèche figurée.

Il en résulte que la vitesse absolue de rotation du flux, vitesse qui est égale à la somme algébrique de la vitesse

de déplacement des pôles dans l'armature et de la vitesse périphérique de celle-ci, va en diminuant à mesure que la machine tourne plus vite. Si le moteur n'entraînait aucune charge et ne présentait pas de résistances mécaniques ou autres, on conçoit que le flux pourrait devenir immobile dans l'espace : à ce moment les deux vitesses composantes étant égales, l'armature exécuterait $\frac{1}{T}$ révolutions par seconde et sa marche serait synchronique avec celle de la machine génératrice du même type.

En fait, les moteurs exposés à Francfort démarrent spontanément avec $\frac{1}{5}$ de leur charge normale et la vitesse angulaire de l'armature s'approche ainsi suffisamment du synchronisme pour que celui-ci s'établisse rapidement quand on excite ensuite les noyaux de la carcasse au moyen d'un courant continu. Cette excitation peut être indépendante ou, plus simplement, être obtenue en reliant le circuit d'excitation aux balais du collecteur Gramme de l'armature. On peut alors imposer à la machine le restant de sa charge. Tant que celle-ci ne dépasse pas une certaine limite, la vitesse du synchronisme se maintient et les pôles de l'armature restent stationnaires devant les pôles de la carcasse.

Si l'on ferme le circuit à courant continu quand, après le démarrage, la vitesse du moteur diffère encore notablement de celle de la génératrice, on constate que le premier s'arrête. Aussi ne peut-on exécuter la manœuvre que lorsque la déviation d'un voltmètre à courants alternatifs relié au circuit des électro-aimants, grande au début, est revenue suffisamment près du zéro de la graduation.

Nous avouons ne pas connaître d'explication absolument satisfaisante de cette différence dans l'effet produit par l'excitation des épanouissements polaires, qui accélère jusqu'au synchronisme la marche du moteur quand celle-ci ne s'en écarte plus beaucoup et, inversement, provoque

l'arrêt quand l'écart est notable. Le cas, quoique plus complexe, présente quelque analogie avec celui d'une aiguille aimantée suspendue au dessus d'un aimant animé d'un mouvement de rotation. L'aiguille n'est entraînée que si l'allure de l'aimant est suffisamment lente.

Il peut sembler que le système de transmission électrique de l'énergie, préconisé par la maison Schuckert et C^{ie}, comporte nécessairement quatre fils de ligne. Cependant il n'en est pas ainsi quand il s'agit de conducteurs de grande longueur. Car les bobines à haute tension des transformateurs dont l'emploi s'impose alors, bobines au nombre de deux dans chaque appareil, admettent un fil de retour commun. Il suffit que les deux bobines à basse tension des transformateurs soient reliées séparément aux deux paires de bagues des machines correspondantes ; ici, en effet, l'usage de trois fils seulement mettrait en court circuit un quart de l'enroulement des armatures.

Notons, en passant, que les machines Schuckert, dont nous venons de parler, présentent une variété d'emploi considérable : elles peuvent servir indifféremment comme génératrices produisant un courant continu ou bien un ou deux courants alternatifs, comme moteurs à courant continu ou à courants alternatifs, comme transformateurs de courant continu en courants alternatifs ou inversement.

Nous avons, pour la clarté du raisonnement, admis au début de cette étude que le champ rotatoire des électromoteurs de la catégorie qui nous occupe est uniforme à chaque instant et conserve la même intensité pendant toute la durée d'une révolution. Cela n'est certainement pas vrai dans la réalité. Car il paraît évident que la distribution des lignes de force magnétique produites par les deux courants diphasés doit changer constamment, puisque la perméabilité de l'air reste la même, tandis que celle des masses de fer subit des fluctuations correspondant aux variations périodiques de l'induction magnétique.

Il en résulte que le couple moteur électro-magnétique développé par l'armature n'est pas constant dans le tour ; mais on comprend qu'on s'approchera d'autant plus de cette invariabilité que la discontinuité du système inducteur sera moindre, c'est-à-dire que le nombre des pôles saillants de la carcasse sera plus grand.

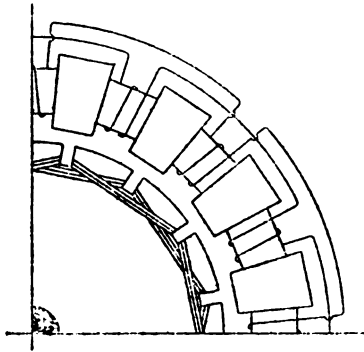


Fig. 5.

C'est en partant de cette idée que MM. Leblanc et Hutin ont composé leur moteur à champ tournant (fig. 5) d'une sorte d'anneau fixe en tôles de fer isolées, présentant un nombre de saillies polaires multiple de quatre. Entre ces dernières sont disposées des bobines excitatrices groupées alternativement en deux circuits. Les enroulements de deux bobines successives du même circuit sont inversés. On constate sans peine que, lorsque les deux circuits sont parcourus par des courants alternatifs décalés d'un quart de période, ce système inducteur développe à travers l'induit plusieurs flux magnétiques se déplaçant simultanément autour de ce dernier les uns à la suite des autres. On constituerait un autre inducteur du même genre, si, après avoir coupé la carcasse de la fig. 1 entre deux pièces polaires et l'avoir ouverte en arc de cercle, on juxtaposait une série d'éléments semblables pour

reformer une circonférence complète, en connectant entre elles les bobines paires et impaires séparément. L'induit mobile de la machine de MM. Leblanc et Hutin est un tambour denté muni également de deux enroulements reliés chacun, par une paire de bagues et de balais, à une résistance extérieure réglable. Nous verrons plus loin comment celles-ci permettent de maintenir constante la vitesse du moteur.

La machine dont il vient d'être question n'est pas encore entrée dans le domaine de la pratique. Il en est autrement de l'électro-moteur von Dolivo Dobrowolski, dont un modèle de cent chevaux était utilisé, à l'Exposition de Francfort, pour recueillir une partie de la puissance électrique envoyée de Lauffen sous la tension d'une vingtaine de milliers de volts.

Nous n'avons pas réussi à nous procurer une description exacte de cette machine ; nous ne pourrions donc qu'en exposer sommairement le principe d'après des renseignements incomplets.

Soient deux cylindres coaxiaux en fer feuilleté munis chacun, comme les armatures Gramme à anneau, d'un enroulement conducteur divisé en trois bobines juxtaposées seulement. Les bobines du cylindre extérieur, que nous supposons fixe, reçoivent trois courants périodiques,

$$i' = I \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

$$i'' = I \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{3} \right),$$

$$i''' = I \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{2T}{3} \right),$$

dont les phases sont décalées d'un tiers de période les unes par rapport aux autres. Il ne faut pas six fils de connexion pour conduire ces courants, car ils jouissent de

la propriété remarquable qu'à chaque instant leur somme algébrique est nulle

$$i' + i'' + i''' = 0.$$

Remarquons en effet que

$$\begin{aligned} & I \left[\sin \frac{2\pi}{T} t + \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{3} \right) + \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{2T}{3} \right) \right] = \\ & I \left[\sin \frac{2\pi}{T} t + \sin \frac{2\pi}{T} t \cos \frac{2\pi}{3} - \sin \frac{2\pi}{3} \cos \frac{2\pi}{T} t \right. \\ & \quad \left. + \sin \frac{2\pi}{T} t \cos \frac{4\pi}{3} - \sin \frac{4\pi}{3} \cos \frac{2\pi}{T} t \right] = \\ & I \left[\sin \frac{2\pi}{T} t \left(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) - \cos \frac{2\pi}{T} t \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} - \frac{1}{2} \sqrt{3} \right) \right] = 0. \end{aligned}$$

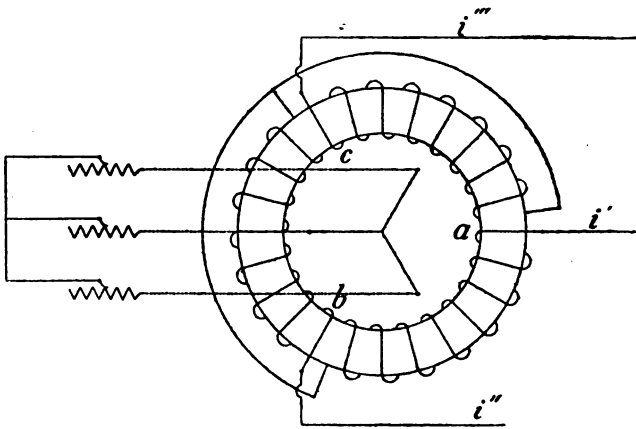


Fig. 6.

On peut donc réunir métalliquement entr'eux les bouts sortants des trois bobines et se contenter de trois conducteurs de transmission, comme l'indique le schéma de la fig. 6. L'un quelconque de ceux-ci doit être considéré comme fil de retour commun pour les deux autres. Une

connexion du même genre doit nécessairement être effectuée dans la machine génératrice qui n'est autre chose qu'un alternateur multipolaire ordinaire, dont l'induit présente trois circuits convenablement disposés par rapport aux pôles inducteurs.

Nous ne nous attarderons pas longtemps à démontrer que, dans l'électro-moteur, le système des trois courants diphasés d'un tiers de période engendre un flux magnétique rotatoire. Constatons simplement que l'on a

$$\begin{aligned} t = 0, \quad i' &= 0 \quad i'' = -\frac{I}{2}\sqrt{3} \quad i''' = \frac{I}{2}\sqrt{3}; \\ t = \frac{T}{3}, \quad i' &= \frac{I}{2}\sqrt{3} \quad i'' = 0 \quad i''' = -\frac{I}{2}\sqrt{3}; \\ t = \frac{2T}{3}, \quad i' &= -\frac{I}{2}\sqrt{3} \quad i'' = \frac{I}{2}\sqrt{3} \quad i''' = 0; \end{aligned}$$

et que, par suite, aux trois instants considérés, la direction générale du flux à travers l'induit passe successivement par les trois orientations : de *ab* vers *c*, de *bc* vers *a*, de *ca* vers *b*, en effectuant une révolution complète en *T* secondes.

Les trois circuits de l'induit qui suit, par entraînement électro-magnétique, le mouvement du flux inducteur ont été, pour ne pas compliquer la figure, simplement représentés par des droites. Ils sont aussi reliés entr'eux à la façon des bobines induites des dynamos Thomson-Houston à courant constant bien connues. Les bouts libres sont attachés à trois bagues, portées par l'arbre, sur lesquelles appuient des balais réunis ensemble à travers trois résistances réglables dont nous allons maintenant expliquer le rôle.

Les électro-moteurs à champ magnétique tournant sont des appareils dont la vitesse angulaire est essentiellement variable avec la charge. En effet, admettons que l'intensité du champ rotatoire n'est pas influencée par les variations

de cette dernière, ce qui, à cause de la réaction d'induit, n'est cependant pas tout à fait vrai. A un couple moteur déterminé développé par la machine, correspond un certain courant efficace induit dans l'armature mobile. Si le couple doit croître, par exemple, ce courant doit aussi augmenter et, quand la résistance du circuit qu'il parcourt est invariable, la force électro-motrice efficace d'induction doit devenir plus grande. En d'autres termes, il faut que la vitesse relative du flux rotatoire par rapport aux fils de l'armature varie en même temps et dans le même sens que la charge. Mais, toujours si l'on suppose l'inducteur fixe, les vitesses du flux et de l'induit sont de même signe et la première des deux est constante, ne dépendant que de la période des courants alternatifs. L'allure de l'induit ralentira donc nécessairement.

Nous avons déjà vu comment, dans le cas spécial de leur machine, MM. Schuckert et Cie obtiennent la constante de la vitesse en modifiant, après le démarrage, le caractère du fonctionnement du moteur, par une excitation auxiliaire à courant continu.

Quand il s'agit des autres types d'alternateurs à champ magnétique rotatoire, on conçoit que l'on peut corriger les écarts de vitesse qui tendent à se produire en insérant dans le circuit induit des résistances extérieures réglables, qu'il conviendra de réajuster à chaque altération du couple résistant.

M. Dobrowolski a réussi à se débarrasser de cette sujétion en faisant la remarque suivante : la vitesse maxima que pourrait atteindre le moteur correspond au cas idéal d'une charge et de frottements de toutes espèces nuls ; alors l'armature tourne aussi vite que le flux, qu'elle accompagne. Le déplacement relatif est nul, de même que l'induction électro-magnétique. La vitesse angulaire de la machine ne pourra jamais descendre de plus de 10 %, par exemple, en-dessous de cette valeur théorique, si l'on a soin de donner à l'armature une résistance intérieure suffi-

samment faible pour que le courant efficace engendré par la force électro-motrice d'induction correspondant à la marche la plus lente que l'on veut admettre, puisse atteindre une intensité capable de vaincre le couple résistant maximum. On parvient ainsi à réaliser, sans aucune manœuvre, une allure d'une régularité suffisante dans la pratique. Seulement, dans ces conditions, il pourrait arriver qu'au moment de la mise en train, alors que la vitesse relative du flux par rapport à l'armature est égale à la vitesse absolue même du premier, le courant induit très intense provoque une réaction magnétique suffisante pour annuler complètement le champ rotatoire inducteur. Le moteur ne démarrerait pas. Pour obvier à cet inconvénient, M. Dobrowolski intercale, au début, des résistances à la suite des bobines induites (fig. 6) et les retire ensuite graduellement du circuit à mesure que le mouvement de la machine s'accélère.

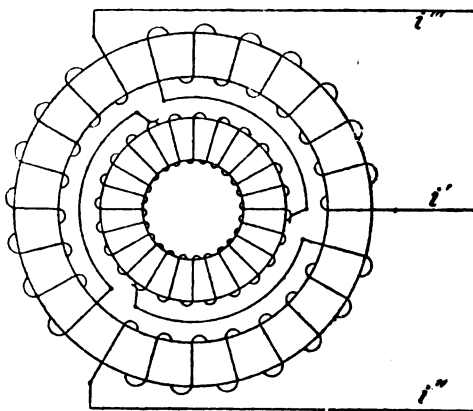


Fig. 7.

Moins pratique, mais assez intéressant, est le moyen employé par la maison Siemens pour régler la vitesse de son électro-moteur à flux tournant. Les trois courants périodiques, diphasés d'un tiers de période, qui alimentent,

par trois fils, le moteur parcourent (fig. 7) successivement l'inducteur fixe et l'armature mobile. Celle-ci est un anneau Gramme dont le collecteur à touches supporte trois balais maintenus à des écartements angulaires invariables de 120° . Pour une position déterminée des frotteurs, le champ rotatoire engendré par l'inducteur coïncide constamment en direction avec celui que produit l'armature et la machine ne se met pas en marche; elle est en quelque sorte au point mort. Mais si on avance ou recule les balais, les deux systèmes de pôles tournants se séparent dans un sens ou dans l'autre et le moteur tourne en avant ou en arrière avec une vitesse qui dépend du décalage et peut être réglée en agissant sur celui-ci.

Nous aurions voulu terminer cette communication par l'examen de quelques données numériques relatives au fonctionnement des électro-moteurs à champ magnétique rotatoire exposés à Francfort. Malheureusement les résultats des expériences faites par le Comité des essais ne nous sont pas encore parvenus. Nous espérons avoir, dans la suite, l'occasion de revenir sur ce sujet.

M. de Weydlich, président. — Je suis certain d'être l'interprète de tous les membres présents en remerciant M. De Bast de sa communication si pleine d'actualité; avec une précision et une clarté parfaites, notre camarade nous a exposé l'état de la question des moteurs à champ magnétique rotatoire qui étaient le principal attrait de la récente exposition de Francfort.

M. le professeur Eric Gerard appelle l'attention des membres de l'Association sur les concours qui auront lieu au commencement de l'année prochaine pour conférer six emplois d'ingénieur à l'Administration des télégraphes de Belgique. Des démarches seront faites auprès du Ministre pour que la date de ces épreuves soit reculée de deux mois, ce qui permettrait à un plus grand nombre de candidats de s'y préparer utilement.

La séance est levée à une heure.

CHRONIQUE.

Informations. — Nos camarades MM. Pescetto, major du génie de l'armée italienne et Bertolini, lieutenant de vaisseau de la marine royale italienne, viennent d'être nommés chevaliers de l'ordre de Léopold.

Les examens de sortie de l'Institut. — Voici les questions qui ont été posées cette année à l'examen écrit de sortie de l'Institut :

Théorie.

Montrez, par un seul exemple dans chaque cas, l'application de la notion du potentiel aux phénomènes magnétiques et aux phénomènes électro-magnétiques et justifiez cette application. (6 points).

Décrivez une méthode propre à déterminer la résistance intérieure d'une pile polarisable. Faites la critique de la méthode. Déterminez les meilleures conditions de l'expérience et montrez comment on détermine l'erreur limite de l'essai. (8 points).

Une bobine cylindrique à axe horizontal est fermée sur elle-même. Sa section droite moyenne est de 1 dcm^2 , sa longueur de 2 m. Elle possède 10000 spires et sa résistance est égale à 1000 ohms. La bobine tourne à raison de 20 révolutions par seconde autour d'un axe normal à l'axe du cylindre et à la direction d'un champ magnétique uniforme dont l'intensité est de 0,1 unité *cgs*. — On demande d'exprimer approximativement en ampères l'intensité efficace du courant. — Tous les calculs doivent être effectués à l'aide de la règle à calcul. (6 points).

Electro-technique.

Indiquez les circonstances qui déterminent l'angle de calage des balais des dynamos. (10 points).

Décrivez les dispositions mécaniques et électriques recommandées à l'intérieur d'une usine électrique alimentant un réseau par le système à trois conducteurs. (14 points).

Exposez la transmission en duplex par la méthode du pont de Wheatstone. (10 points).

Application.

On dispose pour l'essai des électro-moteurs à basse tension d'une source d'électricité extérieure et d'une salle de 5 m. sur 4 m. présentant deux fenêtres sur un des longs côtés et une porte au milieu du côté opposé. Cette salle repose directement sur le bon sol et elle possède des murs épais de tous côtés.

On demande de combiner le projet de l'aménagement de cette salle en vue d'y faire tous les essais que comporte un moteur électrique, à savoir : choix de l'emplacement du moteur ; choix et disposition des appareils de mesure mécaniques et électriques

La description détaillée des appareils de mesure ne fait pas partie de la question.

* * *

Ont subi avec succès ces épreuves MM. :

De Ryckere, Georges,	avec la plus grande distinction,
Francken, Edmond,	avec grande distinction,
Nagtglas-Versteeg, Cornélis,	id.
Van der Goot, Fiepkko,	avec distinction,
Coune, Gustave,	id.
Gritters, Hendrick,	id.
Farman, Dick,	id.
Dawson, Philip,	id.
de Jonge, Willem,	avec satisfaction.
Gourghenbekoff, Abel,	id.
Keiffenheim, Hugo.	id.
Scaramanga, Pantalemon,	id.
Andriga, Alexandre,	id.

* * *

Ces nouveaux camarades se sont tous fait inscrire comme membres effectifs de notre Association.

TABLE DES MATIÈRES

Partie administrative

Liste des membres au 1 ^{er} novembre 1890	3
Procès-verbal de la séance du 30 novembre. Rapports annuels du Secrétaire-Général et du Trésorier. Adresse inaugurale du Président	13
Procès-verbal de la séance du 14 décembre	48
Procès-verbal de la séance du 25 janvier 1891. Modification aux statuts	77
Procès-verbal de la séance du 22 février	121
Procès-verbal de la séance du 22 mars	169
Procès-verbal de la séance du 26 avril	255
Procès-verbal de la séance du 31 mai	309
Procès-verbal de la séance du 28 juin	333
Manifestation en l'honneur de M ^r et M ^{me} Montefiore, à l'occasion de leurs noces d'argent.	352
Procès-verbal de la séance du 25 octobre	357

Communications techniques et scientifiques. Mémoires.

<i>T. de Weydlich.</i> — Adresse inaugurale du Président. Etat actuel de la science électrique.	21
<i>M. du Welz.</i> — Mise en quantité de deux dynamos Compound	39
<i>C. Centurione.</i> — De la distribution du courant dans les réseaux de conducteurs.	49
<i>M. Bayet.</i> — Sur les conditions d'installation des stations centrales d'électricité.	57
Discussion	92
<i>F. Mélotte.</i> — Note sur le calcul des dynamos.	79
<i>M. Bayet.</i> — Transport de l'énergie par les courants alternatifs	96
<i>H. Frénay.</i> — Commutateur d'essai avec parafoudre et mise à la terre	111
<i>Eric Gérard.</i> — Note sur un auxiliaire des électromètres.	122
<i>E. Piérard.</i> — La téléphonie le long des chemins de fer vicinaux belges.	126
Discussion	145

<i>T. de Weydlich.</i> — Considération sur les méthodes servant à la mesure des constantes des piles. Dispositif donnant une grande exactitude	146
<i>M. Bayet.</i> — Comparaison entre l'air comprimé et l'électricité comme agent de transport de force à distance	169-319
<i>G. Henrard.</i> — Note sur le secteur Popp, à Paris	236
<i>J. Cruciani.</i> — Note sur un procédé graphique pour le calcul des enroulements des dynamos	255
Discussion	318
<i>F. Pescetto.</i> — Note sur l'établissement des paratonnerres	309
<i>E. Piérard.</i> — Notice sur le réseau téléphonique de Madrid	317
<i>T. de Weydlich.</i> — Note sur les méthodes de mesure de la puissance des courants alternatifs	333
<i>O. De Bast</i> — Les électro-moteurs à champ magnétique rotatoire	359

Comptes-rendus, traductions, extraits.

Mesure directe de la résistance d'un accumulateur pendant la charge et la décharge, et de la résistance d'un arc voltaïque, par M. Boccali (Colard)	115
Le problème de la vision à distance (téléphonie), d'après M. H. Sutton (T. de W.)	117
A propos de l'hystérésis, par Chas. Steinmetz, E. T. Z. de Berlin (Colard).	155
Courants alternatifs et accumulateurs, par Ross (K.)	157
Compteurs électriques, par Hospitalier.	159
Calorimètre ampèremétrique du Dr Edelman (Colard)	165
L'inductance et son unité proposée, le Henry (Roosen)	279
La construction des étalons de résistance électrique, par le Dr Feussner (Colard)	293
Alliages métalliques pour résistances électriques, par le Dr Feussner et le Dr Lindeck (Colard)	296
Un nouvel appareil pour la mesure des courants continus ou alternatifs; le téléphone optique de M. Max Wien (Colard)	299
Quelques points sur le calcul des chemins de fer électriques, par Günther (Dawson)	301
Que doit être un ingénieur électricien? par Crocker	306
Les nouvelles installations de l'Institut électro-technique Montefiore (G. L.).	344
Le laboratoire d'étalonnage électrique de Bruxelles (G. L.)	355
Les examens de sortie de l'Institut	382





